

**Universidad Publica de Navarra**

***Nafarroako Unibertsitate Publikoa***

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN  
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

# **Evaluación del modelo EUROSEM en dos cuencas cerealistas de Navarra incorporando datos experimentales**

presentado por

ARITZ ARTABE IBARRECHE

INGENIERO AGRÓNOMO  
*NEKAZARITZA INGENIARITZA*

Pamplona, abril 2011

*Me gustaría dar las gracias a todas aquellas personas que me han ayudado a sacar este trabajo adelante. En especial, a mi tutor Rafael Giménez porque sin su ayuda esto no podría ser posible, así como a Javier Díez por todas las dudas que me ha aclarado. También quisiera agradecer el apoyo mostrado en el trabajo en campo de Javier, así como el de Urtzi Leibar. Y por último, a toda la gente del Departamento por haberme ayudado a solventar distintas dudas que han ido surgiendo.*

*Por otro lado, agradezco a todos los familiares y amigos que me han apoyado durante este periodo.*

*Aritz Artabe*

## RESUMEN

## RESUMEN

Para evaluar el efecto medioambiental de la actividad agraria, el Gobierno de Navarra dispone de una serie de cuencas experimentales donde se registran, desde hace más de una década, datos de precipitación, escorrentía, erosión y calidad de las aguas. Se analiza tanto la variabilidad interanual como la espacial (o intercuenas) del proceso de exportación de sedimentos y solutos, y sus implicaciones en la calidad del agua y en el ecosistema local.

Entre las cuencas experimentales arriba mencionadas destacan dos representativas de amplias zonas del territorio en cuanto a usos (cerealistas) y manejos: Latxaga y La Tejería, situadas ambas en la zona media de Navarra. Precisamente con datos recabados de estas cuencas el modelo hidrológico-erosivo EUROSEM (European Soil Erosion Model, modelo distribuido de base física para simular la escorrentía y la erosión de un evento a diferentes escala espacial) fue en el pasado reiteradamente evaluado. Si bien los resultados obtenidos fueron satisfactorios, distaban de ser óptimos. Este modelo se mostraba muy sensible respecto a ciertos parámetros de entrada cuyos valores se obtenían generalmente de tablas y formulaciones proporcionadas por el mismo modelo (en su manual de operaciones). Surgió así la inquietud de determinar hasta qué punto las limitaciones que venía presentando el modelo se debían, más que a ‘fallos’ estructurales, a la calidad o veracidad de algunos de los parámetros de entrada más significativos.

Es así que el objetivo de este trabajo es reevaluar el modelo EUROSEM en las cuencas de Latxaga y La Tejería, incorporando información experimental obtenida *in situ*; concretamente de algunos parámetros (conductividad hidráulica en saturación, humedad antecedente, cohesión del suelo y erosividad de la lluvia, entre otros) considerados altamente significativos en la respuesta del modelo.

Para ello, los suelos de ambas cuencas fueron reagrupados según características granulométricas de sus horizontes superficiales. En cada unidad edáfica o tratamiento se realizaron experimentos de simulación de lluvias en microparcels. Se obtuvieron así, bajo condiciones controladas de volumen e intensidad de lluvia, valores medios de escorrentía y tasa de erosión, principalmente. Por otro lado, en La Tejería se contaba con datos de humedad del suelo realizados en toda la cuenca durante varias semanas.

Además, en cada tratamiento, las posibles vías de movimiento rápido del agua (macroporos y grietas) fueron evidenciadas a través de técnicas de tinción.

Tras la incorporación de datos experimentales, se observa una moderada mejora en la calidad de la simulación efectuada por EUROSEM. Se logró que el proceso de calibración se realizara de una manera más homogénea o regular; es decir, el ajuste de valores fue más parejo en los diferentes eventos seleccionados para la calibración. Por tanto, se espera que una posterior validación arroje mejores resultados que los que se venían obteniendo hasta el momento.

Sin embargo, el modelo no parece ser capaz de simular con éxito valores ‘absolutos’ de la tasa de infiltración de nuestros suelos. Se estima que esto se debe a que dichos suelos están afectados por macroporos y grietas que condicionan el movimiento vertical del agua.

# ÍNDICE

1.-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
2.- MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1.- Descripción de las cuencas experimentales .....	3
2.2.- Medición de las distintas variables .....	7
2.3.- Reclasificación de los suelos predominantes en La Tejería y Latxaga.....	9
2.4.-Ensayos con el simulador de lluvia.....	11
2.5.- Cuantificación de macroporos de flujo preferencial de agua.....	13
2.6.- El modelo EUROSEM.....	15
2.6.1.-Breve descripción del modelo EUROSEM .....	15
2.6.2.-Documentación técnica de EUROSEM.....	21
2.6.3.- Salidas del programa .....	29
2.7.- Obtención de los parámetros reales de entrada del modelo.....	31
3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1.- Experimentación en La Tejería.....	34
3.1.1.- Humedad edáfica .....	34
3.1.2.- Variables hidrológicas .....	35
3.1.2.1.- <i>Infiltración básica</i> .....	39
3.1.2.2.- <i>Tasa de erosión</i> .....	40
3.2.- Experimentación en Latxaga.....	42
3.2.1.- Variables hidrológicas .....	42
3.2.1.1.- <i>Infiltraciones básicas</i> .....	44
3.2.1.2.- <i>Tasa de erosión</i> .....	45
3.3.- Evaluación del modelo EUROSEM para la estimación de escorrentía y producción de sedimentos .....	46
3.3.1.- Caso de estudio: La Tejería .....	46

3.3.1.1.- Eventos seleccionados.....	46
3.3.1.2.- Estimación de parámetros y variables (según Larrañaga, 2006).....	51
3.3.1.3.- Calibración del modelo (según Larrañaga, 2006) .....	61
3.3.1.4.- Evaluación de variables medidas de campo .....	68
3.3.1.5.-Calibración del modelo incorporando datos experimentales .....	73
3.3.2.- Caso de estudio: Latxaga.....	80
3.3.2.1.- Eventos seleccionados.....	80
3.3.2.2.- Estimación de parámetros (según Díez, 2007) .....	84
3.3.2.3.- Calibración del modelo (según Díez, 2007).....	91
3.3.2.4.- Evaluación de variables medidas en campo .....	99
3.3.2.5.- Calibración del modelo incorporando datos experimentales .....	103
3.3.3.- Comparación de las calibraciones (Larrañaga, 2006; Díez, 2007) con las de este trabajo .....	110
4.- CONCLUSIONES .....	115
5.- REFERENCIAS .....	117
6.-ANEXOS.....	122
ANEXO 1: Distintos modelos hidrológicos .....	122
ANEXO 2: Valores tabulados de distintos parámetros de entrada del modelo.....	125

# **1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**



## 1.-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El suelo es un recurso vital, y en gran parte no renovable, que está sometido a una presión cada vez mayor. A nivel mundial, europeo y español, la erosión es el principal problema medioambiental que ocurre en la agricultura convencional; y por consiguiente es el más importante que hay que afrontar para que se mantenga la capacidad productiva de los suelos agrarios (Asociación Española de Agricultura de Conservación, 2001).

Según el Inventario Nacional de Erosión de Suelo (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2009), en el 15,57% de la superficie navarra se manifiestan procesos erosivos altos con una erosión mayor de  $25 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ . A su vez, en el 18,79% la erosión es media, comprendida entre los valores  $10\text{-}25 \text{ tn.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ ; en el resto de la provincia las tasas de erosión son menores que 10 toneladas por hectárea y año.

En las cuencas experimentales que posee el Gobierno de Navarra, la erosión –en rigor, la producción de sedimentos a la salida de las cuencas– es uno de los parámetros que se mide junto a la precipitación, escorrentía y calidad de aguas con el fin de evaluar los efectos de la actividad agraria en el medioambiente. Esta iniciativa comenzó de mano del Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación en 1993 con el desarrollo de una Red de Cuencas Experimentales representativas de las diferentes condiciones naturales y agrarias del territorio. Una de las principales características de esta red es que está concebida para que forme parte de las actuaciones habituales de la Administración y que, por tanto, tiene vocación de permanecer a lo largo de los años. En este sentido cabría darle un carácter similar a las Redes de Estaciones Meteorológicas o de Estaciones de Aforo, que continuamente proporcionan información de carácter básico para una sociedad tan desarrollada y compleja como la nuestra. En consecuencia, se ponen los medios necesarios para su continuo mantenimiento y explotación (Dóñezar *et al.*, 2001)

En dichas cuencas se analiza tanto la variabilidad interanual como la espacial (o intercuenas) del proceso de exportación de sedimentos y solutos y sus implicaciones en la calidad del agua y en el ecosistema local. Estos estudios vienen proveyendo una completa visión global de los procesos hidrológicos y erosivos que acontecen en estas cuencas. Concretamente, se viene abordando el estudio y monitoreo de las entradas y salidas principales (sedimentos y solutos) en cada cuenca.

Las dos cuencas experimentales que han servido como base de este estudio se encuentran en la zona media de Navarra. La Tejería, en el término municipal de

Villanueva de Yerri; y Latxaga, en los términos municipales de Lizoain y Urroz-Villa. En ellas, se han llevado a cabo estudios descriptivos donde se recogen los aspectos geomorfológicos de ambas cuencas, así como datos meteorológicos y exportación de sedimentos (Casalí *et al.*, 2008).

Por otro lado, también se han llevado a cabo estudios de modelización con fines predictivos. La modelización es fundamental para el análisis, comprensión y para el planteamiento de posibles actuaciones. Ahora bien, cualquier modelo de simulación será tanto mejor cuando más se adapte a la realidad utilizando el conocimiento de los procesos concretos y las leyes físicas para su generalización (Morgan *et al.*, 1995). Dichos estudios de modelización, se realizaron mediante el modelo EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) (Morgan, 1994) en las cuencas experimentales de La Tejería (Larrañaga, 2006) y Latxaga (Díez, 2007) para simular el comportamiento hidrológico a nivel de cuenca. Se trata de un modelo basado en eventos y desarrollado para computar el transporte de sedimentos, la erosión y la deposición sobre la superficie del suelo como consecuencia de una tormenta. Puede aplicarse a parcelas o a pequeñas cuencas, por lo que resulta adecuado para las cuencas experimentales citadas.

Como conclusión de los trabajos mencionados anteriormente, EUROSEM se presenta como un modelo promisorio de simulación del comportamiento hidrológico y erosivo en cuencas. No obstante, tras la experiencia de muchos años se observa que su rendimiento es aún mejorable; y surge la inquietud de saber si esto es por limitaciones estructurales del mismo modelo o debido a la calidad de los datos de entrada; ya que muchos de los parámetros del modelo están basados en fórmulas empíricas; y otros se encuentran tabulados en el manual del programa. Es así que algunas variables de entrada del modelo no han sido –hasta la fecha– medidas directamente en campo sino estimadas a través de fórmulas empíricas ajenas a nuestras condiciones. Dichas variables, incluso, se consideran que son muy sensibles y podrían incidir directamente en los resultados finales que se extraen del programa.

Por tanto, el objetivo de esta investigación es el de (re-)evaluar el modelo EUROSEM en dos cuencas agrarias de Navarra (La Tejería y Latxaga) a través de la mejora en la calidad y veracidad de algunos parámetros hidrológicos-erosivos de entrada del modelo, recabados in situ mediante experimentación.

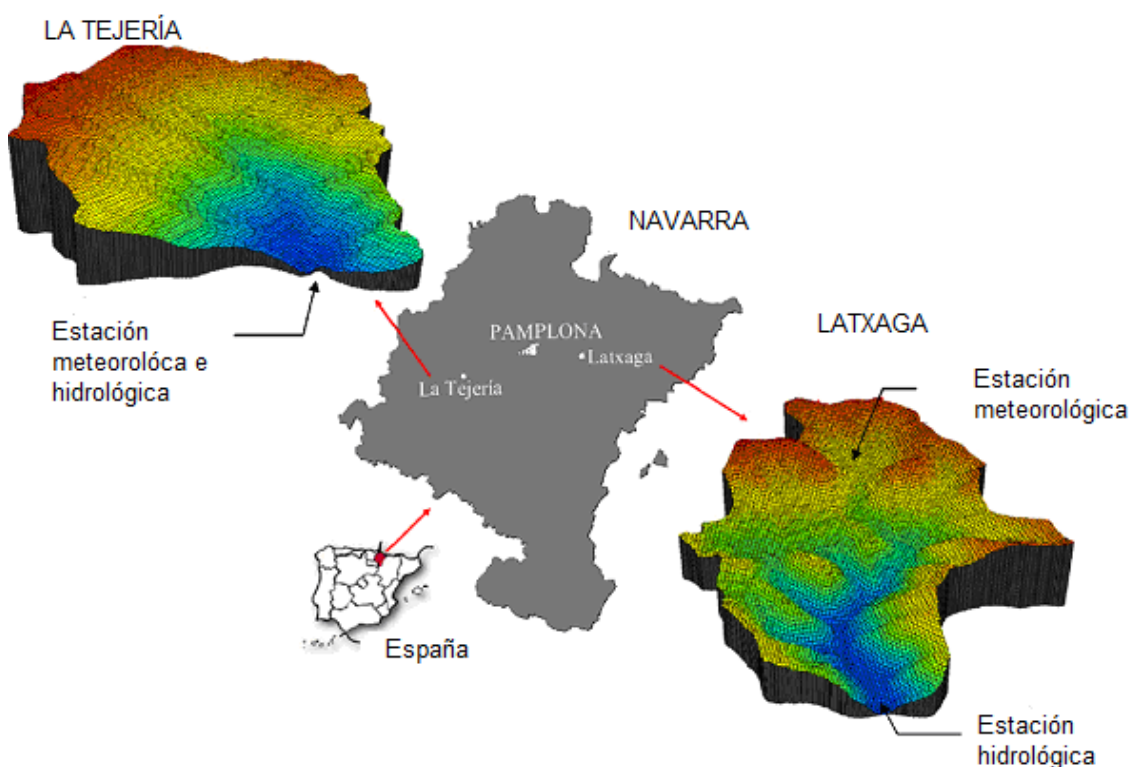
Dicha experimentación a campo se realizará principalmente mediante lluvia simulada en microparcels seleccionadas. Además, para la Tejería, se cuenta con mediciones periódicas de humedad edáfica obtenidas a través de sondas distribuidas en toda la superficie de dicha cuenca.

## **2.- MATERIALES Y MÉTODOS**

## 2.-MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1.- Descripción de las cuencas experimentales

Ambas cuencas experimentales (Fig. 2.1.1), Latxaga (2,07 km<sup>2</sup>) y La Tejería (1,69 km<sup>2</sup>), forman parte de la red de cuencas experimentales que posee el Gobierno de Navarra para evaluar el efecto de las actividades agrícolas en el medioambiente. En dichas cuencas se está realizando el monitoreo de los datos de caudales y sedimentos, así como de concentración de nutrientes desde el año 1996 (Casalí *et al.*, 2005).



**Fig. 2.1.1-** Ubicación de las cuencas experimentales y de sus respectivas estaciones meteorológicas e hidrológicas.

La cuenca de Latxaga cuenta con una superficie total de 207 ha y está situada en la zona central de Navarra, al este de Pamplona. Las coordenadas geográficas son 42°47'7.5"N y 1°26'11.4"W. Se encuentra situada en la zona climática del mediterráneo subhúmedo con una precipitación media anual de 835 mm distribuidos en 95-100 días y una temperatura media anual de 12°C. Las pendientes de la cuenca oscilan de un 5-7% hasta un 30%. Asimismo, los suelos se caracterizan por no ser muy profundos (menos de 0,5 m) y con un horizonte superior de textura franco arcillo-limosa; dándonos una porosidad media del 52% y una densidad aparente media de 1,26 g cm<sup>-3</sup>. Concretamente, el suelo predominante es el Paralithic Xerorthent, que cubre el 43% de la superficie y se localiza en las zonas con mayor erosión, siendo un suelo franco arcillo limoso (Tabla 2.1.2, Fig. 2.1.2).

El 80-90% de la superficie de la cuenca se encuentra cultivado con cereales de invierno, principalmente trigo, albergando una producción media de 3500-4000 kg ha<sup>-1</sup> en las zonas de mayor pendiente y 5500 kg ha<sup>-1</sup> en las zonas más productivas. Se realiza un laboreo convencional empleando arado de vertedera y chísol, y a menudo paralelo a las líneas de nivel.

Por otro lado, la cuenca de La Tejería abarca un área de 169 ha y está situado en la zona central oeste de Navarra, en las siguientes coordenadas geográficas: 42°44'10.6"N y 1°56'57.2"W. También se encuentra en la zona climática del mediterráneo subhúmedo siendo la precipitación media anual de 725 mm distribuidos en 105 días y la temperatura media es de 13°C. La densidad aparente y la porosidad media son de 1,38 g cm<sup>-3</sup> y 0,48, respectivamente. El suelo predominante es el Vertic Haploxerept cubriendo el 41% de la cuenca, y se caracteriza por ser un suelo franco arcilloso (Tabla 2.1.2, Fig. 2.1.2).

En lo referente al uso de la tierra y cultivos predominantes se asemeja a las condiciones mencionadas en Latxaga, ya que el laboreo es convencional y en el 90% del área de la cuenca se cultivan cereales de invierno.

En la Tabla 2.1.1 se indican las principales características morfológicas de ambas cuencas.

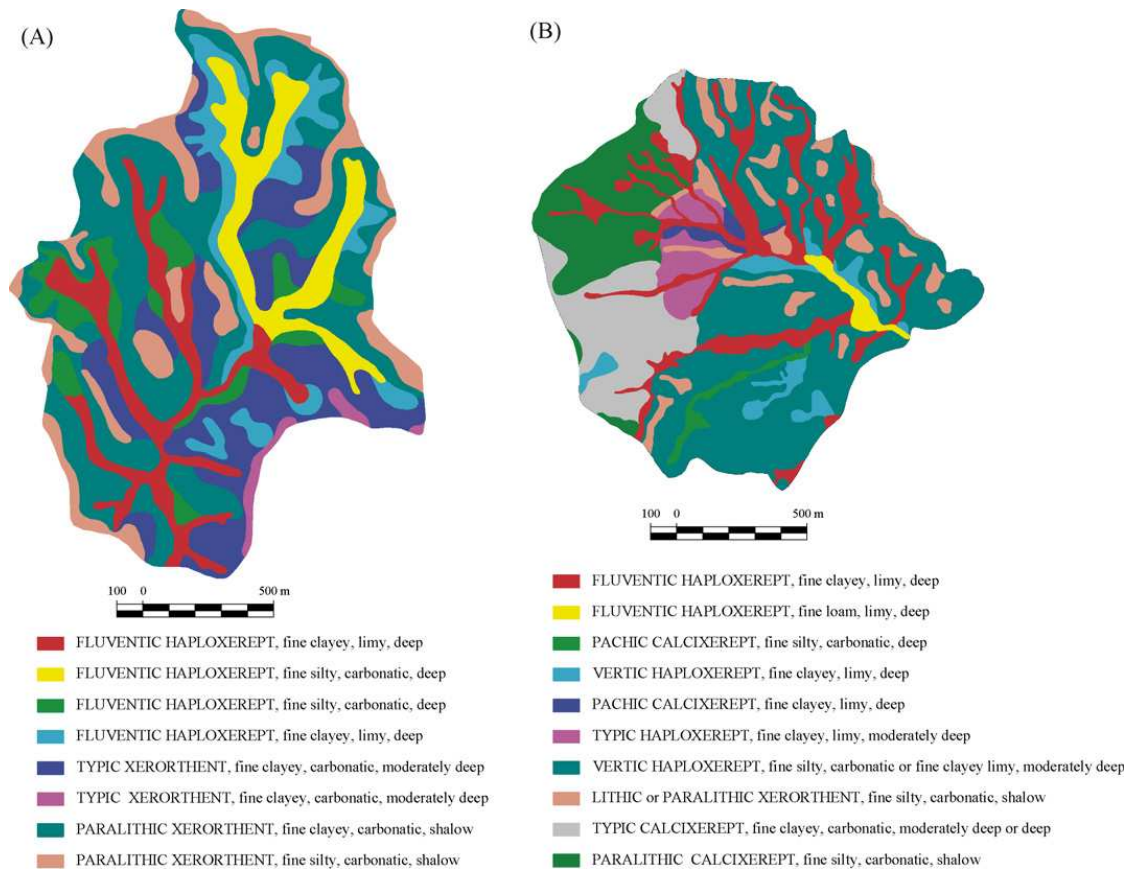
**Tabla 2.1.1-** Características morfológicas de las cuencas de Latxaga y La Tejería .

Características morfológicas	Latxaga	La Tejería
Área (km <sup>2</sup> )	2,07	1,69
Perímetro (km)	6,67	5,46
Longitud de los canales (km)	5,38	3,20
Elevación mínima (m)	504	496
Elevación máxima (m)	639	649
Pendiente media (%)	19,3	14,8
Pendiente media canales (m)	12,4	14,6
Índice de gravelius	1,30	1,17
Densidad de drenaje (km km <sup>-2</sup> )	2,61	1,91
Shape factor	0,44	0,85

En la tabla 2.1.2 se muestran los distintos suelos de cada cuenca agraria:

**Tabla 2.1.2-** Principales suelos de las cuencas de Latxaga y La Tejería

Clasificación USDA	Geomorfología	Clase textural del horizonte superior	Superficie (ha)	Materia orgánica (%)
<b>LATXAGA</b>				
Fluventic Haploxerept	Fondos de vaguada	Franco arcillo limosa	21.99	1.82
Fluventic Haploxerept	Fondos de vaguada	Franco limosa	20.13	1.80
Fluventic Haploxerept	Laderas de acumulación	Franco arcillo limosa	13.58	1.89
Fluventic Haploxerept	Laderas de acumulación	Franco arcillo limosa	16.39	1.48
Typic Xerorthent	Laderas de erosión	Franco arcillo limosa	41.37	2.48
Typic Xerorthent	Laderas de erosión	Franco arcillo limosa	2.72	1.92
Paralithic Xerorthent	Laderas de erosión	Franco arcillo limosa	65.67	1.81
Paralithic Xerorthent	Laderas de erosión	Franco arcillo limosa	23.15	1.51
<b>LA TEJERÍA</b>				
Fluventic Haploxerept	Fondos de vaguada	Franco arcillosa	26.76	1.99
Fluventic Haploxerept	Fondos de vaguada	Franco arcillo limosa	2.58	1.99
Pachic Calcixerept	Fondos de vaguada	Franco arcillo limosa	2.35	1.58
Vertic Haploxerept	Laderas de acumulación	Arcillosa	6.39	1.77
Pachic Calcixerept	Laderas de acumulación	Franco arcillosa	1.87	1.74
Typic Haploxerept	Laderas de erosión	Arcillo limosa	6.46	1.16
Vertic Haploxerept	Laderas de erosión	Franco arcillosa	69.38	1.05
Lithic/Paralithic Xerorthent	Laderas de erosión	Arcillo limosa	11.64	3.75
Typic Calcixerept	Laderas de erosión	Franco arcillosa	21.69	2.31
Paralithic Calcixerept	Laderas de erosión	Franco arcillo limosa	19.78	1.45

**Fig. 2.1.2-** Mapas de suelos de las cuencas de Latxaga (A) y La Tejería (B)

En ambas cuencas, la producción de sedimentos se concentra mayoritariamente en invierno. En esta época del año, la generación de escorrentía se ve favorecida por el alto contenido hídrico de los suelos; que además se encuentran casi desnudos, al momento de producirse las lluvias. Sin embargo, no es raro que en verano se produzcan también altas descargas de sedimentos debido a fuertes tormentas. Es así que se registraron valores (año-año) de sedimento exportados de hasta 5600 kg/ha/año en la cuenca de la Tejería, mientras que en Latxaga los valores fueron mucho más discretos (Casalí *et al.*; 2008). Ahora bien, en subcuencas de La Tejería se han registrado importantes pérdidas de suelo asociadas a la formación de cárcavas efímeras y surcos (Casalí *et al.*, 1999). Por el contrario, en Latxaga, la erosión por cárcavas efímeras y surcos parece carecer de relevancia.

## **2.2.- Medición de las distintas variables**

Cada cuenca experimental cuenta con su respectiva estación meteorológica e hidrológica (Fig. 2.1.1); en la primera obtenemos datos de temperatura, precipitación, humedad del aire, velocidad del viento y dirección, temperatura del suelo y radiación solar en intervalos de tiempo de diez minutos (Del Valle de Lersundi y Donézar, 1995; Donézar y Del Valle de Lersundi, 2001).

La estación meteorológica de Latxaga se instaló en el año 1998 y se encuentra en localidad de Beortegui situada a una altitud de 580 metros. Las coordenadas de ubicación son las siguientes:

- Latitud: 4739750
- Longitud: 628103

Por su parte, la estación meteorológica de La Tejería instalada el mismo año se encuentra situada en la localidad de Villanueva de Yerri en las siguientes coordenadas a una altitud de 498 metros:

- Latitud: 4732156
- Longitud: 686011

Además, existe una estación hidrológica a la salida de cada cuenca (Fig. 2.1.1) donde se registran datos de caudal y turbidez en intervalos de tiempo de diez minutos. La descarga de caudal se realiza en una vertedera de sección transversal en “V” truncada (Bos, 1978). El diseño de dicha estructura permite el paso de los sedimentos a través de la sección de control donde se medirá después su turbidez. La descarga está controlada mediante una sonda presión que detecta los aumentos en el nivel del agua. Para la verificación se suele emplear un molinete hidráulico medidor de flujo (Bos, 1978).

Todos los días, cada 6 horas (3h, 9h, 15h y 21h), se toman muestras de agua en 24 recipientes con un diámetro de 0,66m y 500 ml cada uno mediante un muestreador programable para medir su contenido en nutrientes y sedimentos en el Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Navarra mediante métodos estandarizados. Las cuatro muestras que se toman al día se mezclarán para obtener resultados representativos. Todas las botellas van numeradas para realizar correctamente la toma de datos (Isidoro *et al.*, 2003).

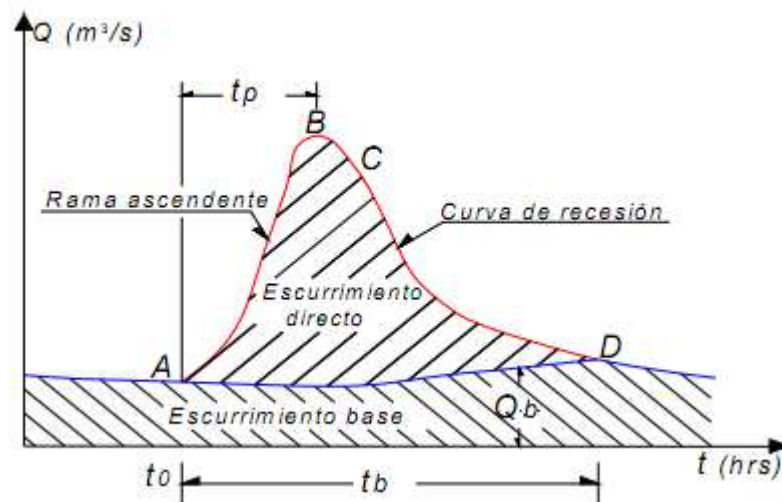
Existe otro muestreador que tomará los datos en caso de crecidas en el caudal, es



decir, es un muestreador de avenidas. Para que comience a tomar muestras se debe cumplir un mínimo de nivel, mínimo de turbidez y un valor mínimo del producto de los incrementos de nivel y turbidez. Así, el muestreador comenzará a trabajar, volverá a realizar el mismo proceso cada 30 minutos si se cumplen las condiciones. Cuando se cumplan las tres condiciones, se inicia una secuencia de mínimo de tres tomas, la primera en ese momento, la segunda a la hora y la siguiente a la media hora.

De esta forma podremos crear rectas de regresión lineal de dos formas distintas. La primera con los pares de datos de turbidez y concentración de sedimentos (g/l) recogidos a las horas mencionadas anteriormente. La segunda forma sería introduciendo los pares de datos de turbidez y concentración obtenidas cuando sucede una avenida.

EUROSEM es un programa que trabaja con hidrogramas de escorrentía (Fig. 2.2.2) directa por lo que nos veremos obligados a eliminar el flujo base del hidrograma real para poder compararlos; esto se realizará siguiendo el método Horton (Chow, 1994).



Punta de levantamiento (A)

Pico (B)

Punto de inflexión (C)

Tiempo de pico ( $T_p$ )

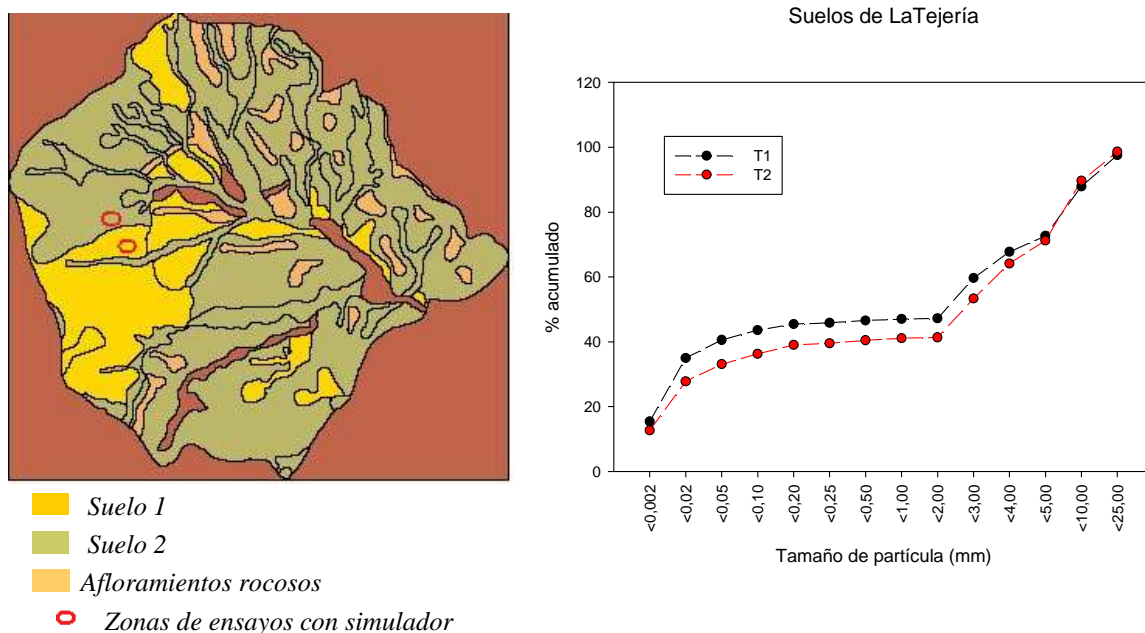
Tiempo base ( $T_b$ )

Final de escorrentía directa (D)

**Fig. 2.2.2.- Representación del flujo base de un hidrograma junto a sus distintos componentes**

### 2.3- Reclasificación de los suelos predominantes en La Tejería y Latxaga

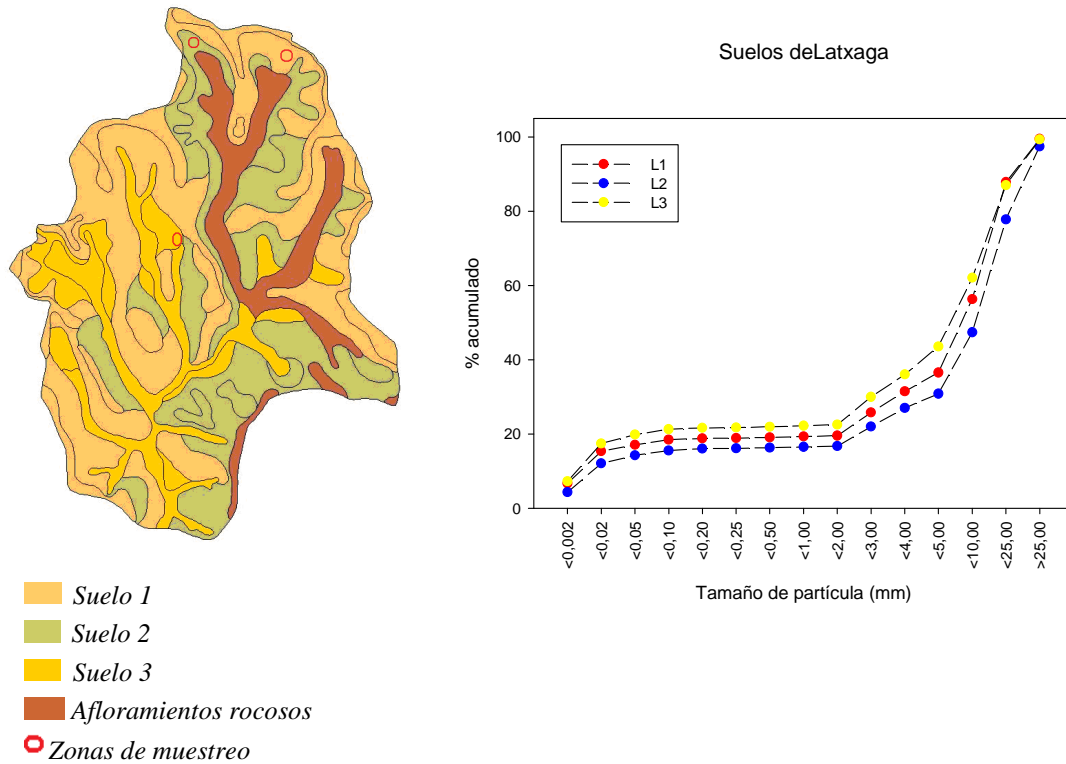
Con el fin de recabar información detallada del comportamiento hidrológico y erosivo de los principales suelos de La Tejería y Latxaga, se llevarían a cabo sendas simulaciones de lluvias. Para tal fin, y en primer lugar, los suelos de ambas cuencas fueron reclasificados según tamaño de partículas de sus horizontes superiores de acuerdo a un criterio granulométrico más amplio –hasta 25 mm de diámetro aparente, y por tanto sin previa dispersión de partículas– que el convencional –sólo hasta 2 mm– (Giménez *et al.*, 2009). Con esto se perseguía clasificar los suelos según su ‘funcionamiento hidrológico’ y no por su génesis (Tabla 2.1.2; Fig. 2.1.2). Así, en cada la cuenca de La Tejería identificaron 2 grandes grupos de suelo (Fig. 2.3.1), mientras que en Latxaga fueron 3 (Fig.2.3.2), elaborándose sendos mapas de suelos.



**Fig. 2.3.1.-** Mapa de suelos de La Tejería (izq) y su correspondiente análisis granulométrico (der)

Por otro lado y a partir de modelos digitales de elevación ya existentes, se confeccionaron dos tipos de mapas topográficos simplificados de cada cuenca. Uno divide a la cuenca en 3 grandes zonas de áreas similares: una zona baja, cercana a la salida de la cuenca; una zona alta, opuesta a la primera, lindante con la divisoria de aguas; y una zona intermedia entre las dos primeras. El segundo tipo de mapa es similar al anterior, pero concebido como 3 bandas concéntricas o buffer rodeando el cauce de drenaje principal. La combinación de estos mapas topográficos con aquel de suelos arriba mencionado permitió definir potenciales zonas de muestreo y de experimentación necesarias para completar los objetivos propuestos.

Sin embargo, dado el elevado número de posibles tratamientos –resultante de la combinación suelo-topografía– finalmente se optó por trabajar con los suelos contrastantes ubicados en una única posición topográfica: aquella zona baja del terreno, cercana a la salida de la cuenca. Es así que, en cada cuenca, se definieron los tratamientos (según suelos predominantes), con 3 repeticiones en cada caso (Fig. 2.3.1; Fig. 2.3.2).



**Fig. 2.3.2.-** Mapa de suelos de Latxaga (izq) y su correspondiente análisis granulométrico (der)

## **2.4.-Ensayos con el simulador de lluvia**

El simulador de lluvia es un instrumento de investigación diseñado para aplicar agua de forma similar a los episodios tormentosos naturales (Molina *et al.*, 2007). Su éxito radica en que mediante la simulación de lluvia se controla una misma intensidad de precipitación (parámetro de mayor variabilidad en el ciclo hidrológico) siendo posible medir la evolución de la escorrentía y la cantidad de sedimento generada por la erosión (García-Ruiz *et al.*, 2009). Asimismo, se pueden obtener una gran cantidad de datos en un periodo relativamente corto de tiempo (Meyer, 1985). No obstante, presenta ciertas limitaciones como la dificultad de crear tamaños de gota característicos de distintos episodios tormentosos; así como simular su velocidad terminal y tamaño (Calvo *et al.*, 1988).

En cuanto se han determinado los distintos suelos de las cuencas (ver apartado anterior), se procedió a realizar ensayos con un simulador de lluvia en los suelos predominantes de cada cuenca para obtener algunos de los datos de entrada más relevantes en los procesos hidrológicos.

En dichos escenarios, el simulador de lluvia se anclará al suelo mediante los vientos de tal forma que la boquilla (Fig. 2.4.1) se situará a 3,5 metros de altura respecto a la parcela donde se aplicará el agua con una intensidad cerca a los 25 mm/h. Dicha parcela se delimitará con tres tiras metálicas longitudinales y un cuarto elemento que será la canaleta donde se recogerá el agua de escorrentía. Así, delimitaremos un espacio cuadrulado de 0,8 m<sup>2</sup>. Aquí, se cortará el césped mediante unas tijeras procurando que solo quede un 5% de vegetación, la mínima posible, para que los ensayos se realicen en igualdad de condiciones. De la parte inferior de la canaleta el agua de escorrentía caerá en una tubería que la llevará hasta un cubo donde recogeremos la muestra. A los lados de la parcela, se ponen cuatro pluviómetros para cuantificar la lluvia que cae realmente en la parcela (Fig 2.4.1). Otro de los elementos relevantes es la estructura rompevientos (Fig. 2.4.1.), que evitará que la fuerza del viento se lleve las gotas de agua.

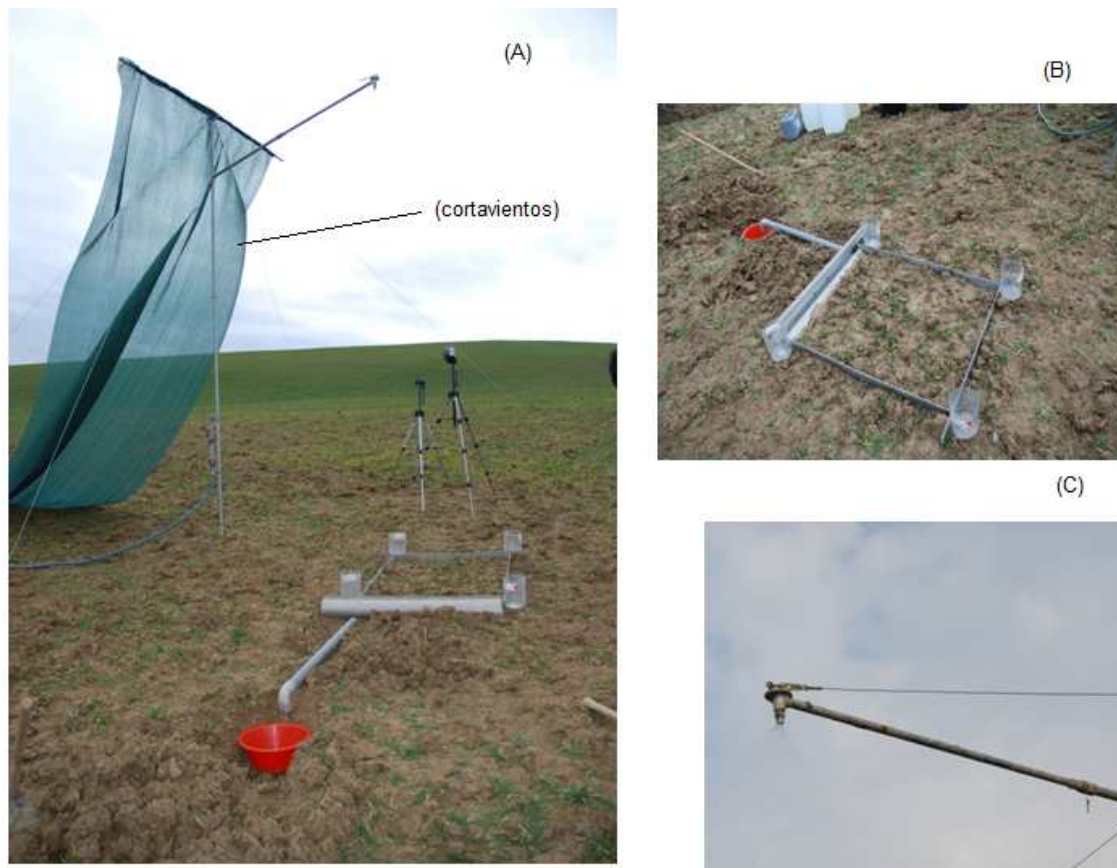
Durante la experimentación se fueron tomando muestras del volumen de escorrentía cada diez minutos (en caso de una escorrentía considerable cada 5 minutos); de los cuales se podrá determinar la concentración de sedimentos tras secar las muestras en la estufa. Se tomó como criterio para la finalización del experimento que la escorrentía fuese constante en las tres últimas mediciones.

Así, en la tabla 2.4.1 se resumen los parámetros experimentales obtenidos a través de la simulación. Se debe tener en cuenta que lo realmente medido mediante la experimentación con el simulador de lluvia es la escorrentía y se infiere la infiltración

(diferencia entre la precipitación y la esorrentía).

**Tabla 4.2.1.-** Listado de parámetros experimentales obtenidos a través de cada simulación

Parámetro	Unidades
Volumen de esorrentía	ml
Coeiciente de esorrentía	%
Infiltración instantánea	mm/h
Infiltración acumulada	ml
Concentración de sedimentos	g/l
Sedimento erosinado	g/min
Sedimento acumulado	g



**Fig. 2.4.1.-** Montaje del simulador de lluvia (A), detalle de la parcela experimental (B) y detalle de la boquilla (C)



## **2.5.- Cuantificación de macroporos de flujo preferencial de agua**

En forma complementaria a los experimentos de simulación de lluvias, en cada tipo de suelo de ambas cuencas, se procedió a detectar posibles vías de flujo preferencial de agua. Para ello se siguió una técnica de coloración de macroporos activos propuesta por Bouman y Decker (1978), cuyos principios y protocolo se indican a continuación, brevemente.

Se mezclarán 5 g de yoduro de potasio (KI) por cada litro de agua que alimentará el simulador. La intensidad de la lluvia será de 25 mm/h durante los 30 minutos que se aplicará en una superficie de  $(1,5 \times 1,5 \text{ m}^2)$ . Después, se dejará 30 minutos después de su aplicación para que se infiltre correctamente. Una vez transcurrido el tiempo, se aplica almidón de maíz mediante un cernidor en la superficie del suelo y se le deja unos minutos para que absorba el agua (Fig. 2.5.1). Después, se le aplicará hipoclorito de sodio (ejemplo: lejía) para que se de la reacción química (ver abajo) y se produzca el cambio de coloración tanto en superficie (Fig 2.5.1) como en profundidad tras realizar un corte transversal (Fig, 2.5.2) donde se observa el flujo preferencial por un macroporo.



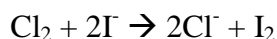
**Fig. 2.5.1.-** *Detalle del almidón en el suelo (izq) y su posterior cambio de color al aplicar el hipoclorito (der)*



**Fig. 2.8.4-** *Detalle del flujo preferencial verticalmente*

El modo de poder visualizarlo se basa en una reacción química que produce un cambio de coloración que contrasta con el color del suelo. El ión de yoduro ( $I^-$ ), soluble en agua, será transportado a través de la matriz del suelo junto con el agua ya que tiene similares propiedades de transporte. Después se realizará un corte en el suelo donde se aplicará una fina capa de almidón muy seco con el fin de que absorba el agua. El  $I^-$  tiene una gran capacidad de ser oxidado en condiciones aerobias dando como resultante una coloración oscura con tonalidades azules. El cambio de coloración es muy sensible a la presencia del ión de yoduro por lo que se hará visible en concentraciones de 5-15 g/l.

Para ello, deberemos aplicar algún producto que contenga  $Cl_2$  para obtener la siguiente reacción química:



El  $I_2$  que se forma en esta reacción enseguida adoptará un color azul oscuro que será indicador del paso del agua por esa zona. Así, la zona podrá ser excavada para obtener distintos planos bidimensionales que nos aporten información sobre el trayecto que ha realizado el agua.

## 2.6.- El modelo EUROSEM

### 2.6.1.-Breve descripción del modelo EUROSEM

EUROSEM es un modelo basado en sucesos y desarrollado para computar el transporte de sedimentos, la erosión y la deposición sobre el suelo como consecuencia de una tormenta. Puede aplicarse tanto a cuencas pequeñas como a parcelas aisladas (Morgan, 1994; Morgan, Quinton y Rickson; 1994). Existen distintos modelos que se analizarán en el anexo 1.

El modelo EUROSEM funciona en forma de cascada. Por ejemplo, una cuenca en estudio se divide en unidades homogéneas en cuanto pendiente, tipo de suelo y cubierta vegetal. Estas unidades se engarzan entre sí conformando una especie de cascada de planos y canales a través de los cuales se simulará el transporte de agua y sedimentos.

En la figura 2.6.1 se muestra el circuito que sigue el agua y los sedimentos en la simulación llevada a cabo por EUROSEM.

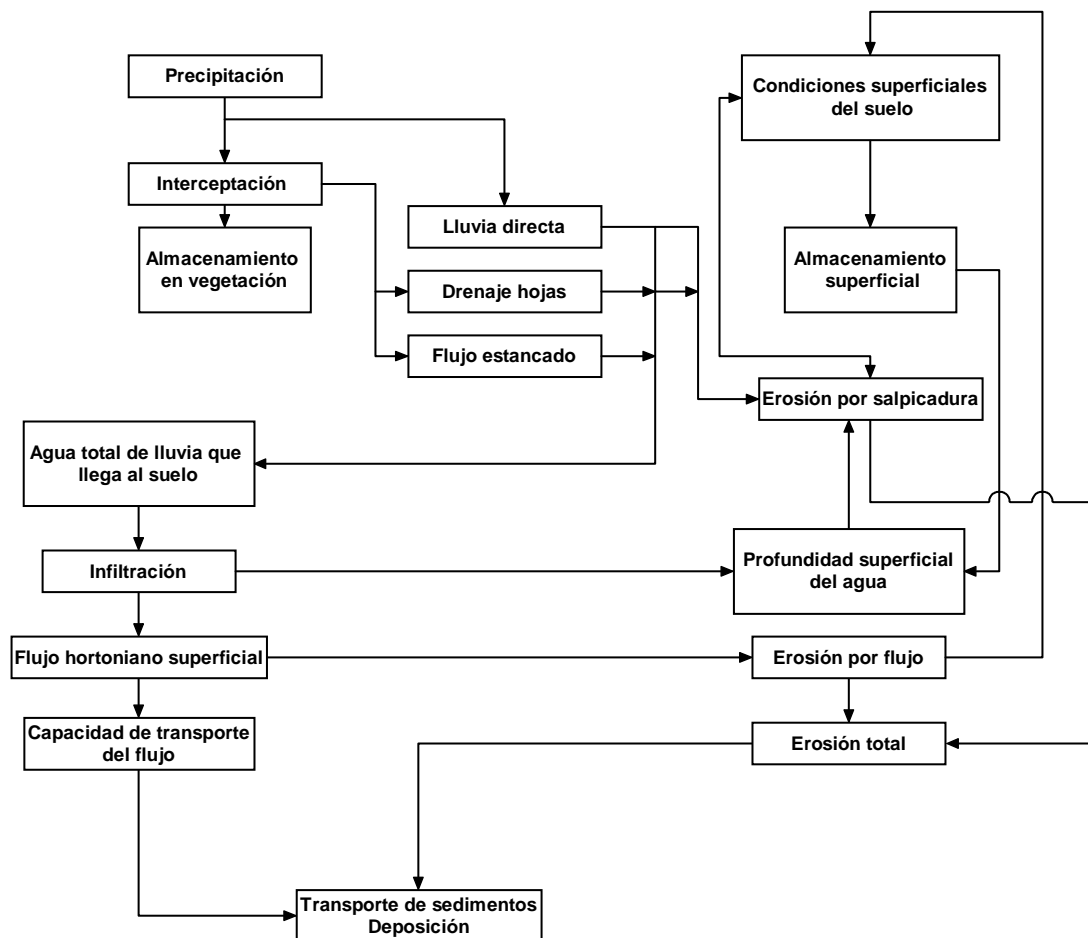


Fig 2.6.1.- Diagrama de flujo del modelo EUROSEM



El modelo calcula las pérdidas de suelo como una descarga de sedimento definida como el producto de las proporciones del flujo y la concentración de sedimentos en el flujo, para dar un volumen de sedimentos que pasa por un punto dado en un tiempo determinado. El cálculo está basado en la ecuación de balance dinámico de masas (Bennet, 1974; Kirkby, 1980; Woolhiser *et al*, 1990).

$$\frac{\delta(AC)}{\delta t} + \frac{\delta(QC)}{\delta x} - e(x,t) = qs(x,t) \quad (2.1)$$

donde:

$C$ : concentración de sedimentos ( $m^3/m^3$ )  
 $A$ : área de la sección transversal del flujo ( $m^2$ )  
 $Q$ : descarga ( $m^3/s$ )  
 $qs$ : extracción de sedimentos por unidad de flujo ( $m^3/s \text{ cm}$ )  
 $e$ : erosión total ( $m^3/s \text{ cm}$ )  
 $x$ : distancia horizontal  
 $t$ : tiempo

Tras definir la ecuación general por la que se rige el modelo (eq. 2.1), se analizarán otras formulaciones usadas en EUROSEM en el modelado de diferentes aspectos del ciclo hidrológico.

### **Interceptación**

Conforme la lluvia cae sobre la vegetación, ésta se divide en dos partes: la que llega al suelo directamente *DT* (*direct throughfall*) y la que es retenida por las hojas *IC* (*intercept by the cover*). El volumen de agua almacenado en la interceptación ( $IC_{store}$ ) para un tiempo ( $t$ ), se calcula basándose en la ecuación propuesta por Merriam (1973):

$$IC_{store} = IC_{max} [1 - \exp(-R_{acum} / IC_{max})] \quad (2.2)$$

donde:

$IC_{max}$ : volumen máximo de agua interceptada que puede acumular la cubierta vegetal  
 $IC_{store}$ : volumen de agua almacenado en la interceptación  
 $R_{acum}$ : lluvia acumulada

La lluvia que es interceptada a corto tiempo, se denomina lluvia temporalmente interceptada (*TIF*); alcanzando posteriormente la superficie del suelo como flujo estancado (*SF*) y drenaje de las hojas (*LD*).

La diferencia entre el volumen de lluvia temporalmente interceptada y el volumen de flujo estancado determina el volumen drenado desde las hojas.

Finalmente, la lluvia total que alcanza la superficie del suelo ( $NR$ ), que está disponible para la infiltración, es la suma de la lluvia directa, el flujo estancado y el desagüe de las hojas. Esta relación se expresa como:

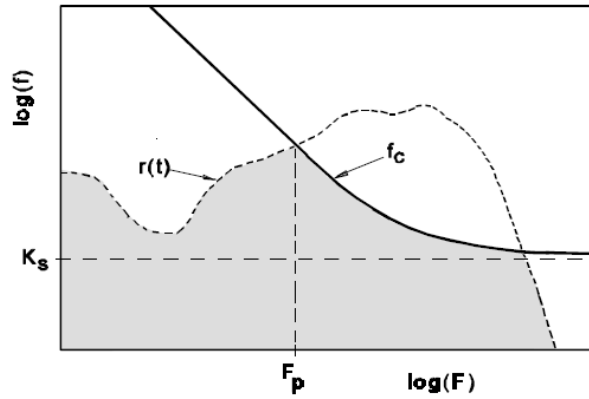
$$LD = TIF - SF \quad (2.3)$$

$$NR = DT + LD + SF = R - IC_{store} \quad (2.4)$$

Donde  $R$  representa la lluvia

### Infiltración

El proceso de infiltración para suelos uniformes está compuesto de tres partes. Inicialmente, la infiltración está limitada a la intensidad de lluvia y la infiltración acumulada,  $F$ , se acumula a una velocidad igual a la precipitación  $r$  (Fig. 2.6.2.).



**Fig. 2.6.2.- Representación de la infiltración en el modelo EUROSEM**

El punto en el cual la función de infiltración,  $f_c$  llega a su límite se denomina punto de encharcamiento, el cual se produce en un tiempo  $t_p$  y a una infiltración acumulada  $F_p$ . Después de ese punto, la ecuación de Smith y Parlange (citado en Woolhiser *et al.*, 1990) define la tasa de infiltración  $f$  limitada por  $f_c$ .

$$f_c = k_s \frac{\exp(F/B)}{\exp(F/B) - 1} \quad (2.5)$$

donde:

- $f_c$ : función de infiltración
- $k_s$ : conductividad hidráulica en saturación
- $F$ : infiltración acumulada
- $B$ : déficit de saturación del suelo definido

La línea diagonal en la asintota viene dada por la eq. 2.6, donde se aproxima a la relación de infiltración para condiciones de gravedad libre.

$$f_c = B \times \frac{k_s}{F} \quad (2.6)$$

El valor asintótico de la curva vale  $k_s$  (conductividad hidráulica en saturación). La tercera parte comienza cuando la lluvia cesa o adquiere valores menores que la capacidad de infiltración. Así, EUROSEM realiza una simple modificación de la infiltración durante la recesión por medio de la descripción de la microtopografía del terreno mediante el parámetro *RECS* (mm).

$$f_i = f_{i-1} \frac{h}{RECS} \quad (2.7)$$

donde:

$h$ : altura del flujo

*RECS*: factor de recesión de la infiltración

### ***Condiciones superficiales del suelo***

La rugosidad de la superficie se expresa mediante el parámetro *RFR*, definido como la proporción entre la distancia en línea recta entre dos puntos en el suelo ( $X$ ) y la distancia real medida encima de todas las irregularidades del micro relieve ( $Y$ ).

$$RFR = ((Y - X) / Y) * 100 \quad (2.8)$$

donde:

*RFR*: medida de aspereza

$X$ : distancia en línea recta entre dos puntos en el suelo

$Y$ : distancia real medida encima de todas las irregularidades del microrelieve

Este valor se convierte en el valor de profundidad útil de almacenamiento ( $D$ ), usando la ecuación de regresión propuesta por Auerswald (1992).

$$D = \exp(-6,66 + 0,27 * RFR) \quad (2.9)$$

donde:

$D$ : profundidad útil de almacenamiento

### ***Proceso de escorrentía superficial***

EUROSEM ha sido diseñado para trabajar en episodios tormentosos, por lo que sólo usa ecuaciones de flujo turbulento, debido a las perturbaciones provocadas por las gotas de lluvia.

A partir del momento en que la lluvia excede la infiltración y las depresiones de almacenamiento están colmadas, se genera escorrentía. En EUROSEM, la escorrentía a lo largo de una ladera, un surco o un canal se considera un proceso unidimensional, en el que la descarga ( $Q$ ) se relaciona con el radio hidráulico ( $r$ ). La fórmula está basada en la ecuación de Manning para la velocidad del flujo,  $u$ .

$$u = \alpha \cdot r^{m-1} \quad (2.10)$$

donde:

$r$ : radio hidráulico

$\alpha$ : ( $s$ )<sup>0,5/n</sup>

$n$ : valor de  $n$  de Manning

$m$ : 5/3

Con respecto a la descarga  $Q$ , se define como:

$$Q = uA = \alpha \cdot p \cdot r^m \quad (2.11)$$

Siendo la  $A$  igual al área de la sección transversal y  $p$  el perímetro mojado.

Esta ecuación se combina con la ecuación de la continuidad para dar:

$$\frac{p \delta r}{\delta t} + \frac{\alpha p}{m} r^{m-1} \frac{\delta r}{\delta x} = q(x, t) \quad (2.12)$$

EUROSEM resuelve ecuaciones como la anterior (2.12) empleando el método de Newton-Raphson para una malla de diferencias finitas para cuatro puntos (Pearson, 1983; Woolhiser *et al.*, 1990).

### **Proceso de erosión**

EUROSEM aborda el proceso de erosión, desde dos aspectos distintos. El primero correspondiente a la separación de las partículas del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia (provenientes de la lluvia directa y el drenaje foliar). El segundo hace referencia a la erosión por escorrentía modelada en términos de la teoría generalizada propuesta por Smith *et al.*, (1990).

Así, el término  $e$  de la eq. 2.1, se define de la siguiente manera:

$$e = Di + Df \quad (2.13)$$

donde:

$e$ : erosión total ( $m^3/s \text{ cm}$ )

$Di$ : partículas erosionadas por las gotas de lluvia

$Df$ : diferencia entre las partículas del suelo erosionadas por el flujo y las que se depositan

La tasa de desprendimiento por impacto de las gotas de lluvia ( $Di$ ) se calcula como:

$$Di = k \cdot KE^{1,0} \cdot e^{-2h} \quad (2.14)$$

donde:

$k$ : desprendimiento del suelo por el impacto de las gotas de lluvia

$h$ : profundidad de la lámina de agua

$KE$ : Energía cinética de la lluvia

Asimismo, la energía cinética se determina independientemente a partir de la precipitación directa y el drenaje foliar, utilizando la *eq. 2.15* para la energía de un milímetro de precipitación directa, y la *eq. 2.16* para un milímetro de drenaje foliar (Brandt, 1990).

$$KE(DT) = 8.95 + (8.44 \cdot \log I) \quad (2.15)$$

$$KE(LD) = (15.8PH^{0.5}) - 5.87 \quad (2.16)$$

donde:

$KE(DT)$ : energía de la lluvia que alcanza la superficie del suelo como lluvia directa ( $J/m^2mm$ )

$I$ : Intensidad de lluvia ( $mm/h$ )

$KE(LD)$ : energía procedente del drenaje de las hojas ( $J/m^2mm$ )

$PH$ : altura eficaz de la planta ( $m$ )

Por otro lado, la tasa de desprendimiento de partículas del suelo por el flujo se puede modelizar como un balance entre desprendimiento y deposición:

$$Df = \eta \cdot \omega \cdot v_s \cdot (C_{max} - C) \quad (2.17)$$

donde:

$\eta$ : eficiencia del proceso de desprendimiento

$\omega$ : anchura del flujo

$v_s$ : velocidad de las partículas

$C_{max}$ : Concentración máxima de sedimentos del flujo

$C$ : Concentración de sedimentos

## **2.6.2.-Documentación técnica de EUROSEM**

### **2.6.2.1.- Los ficheros de entrada**

EUROSEM necesita dos ficheros de entrada, uno con los datos pluviométricos correspondientes al evento y otro con los datos geomorfológicos referentes a la cuenca. Los primeros irán acompañados con la extensión “.PCP”, mientras que los segundos lo harán acompañados por la extensión “.PAR”. Una vez que se corre el modelo con dichos archivos, el modelo nos generará tres nuevos archivos (dinámico, estático y auxiliar) a los cuales podremos asignarles un nombre.

EUROSEM trabaja interactivamente con sus ficheros de entrada y salida, de manera que si el usuario está usando reiteradamente el modelo y necesita variar cada vez un parámetro, el programa ofrece la posibilidad de reutilizar los ficheros sin necesidad de tener que volver a llamarlos.

Con el fin de facilitar la ejecución del modelo, EUROSEM facilita archivos de precipitación como paramétricos de forma que se podrán cambiar las variables en dichas plantillas sin tener que crearlos.

### **2.6.2.2.- Creación de los ficheros de entrada**

EUROSEM lee los datos de entrada a partir de dos ficheros a los que el usuario podrá proporcionarles un nombre. El primero se corresponderá con los datos pluviométricos cercanos a la cuenca de estudio; el segundo, en cambio, llevará los datos necesarios para caracterizar los planos y canales de la cuenca. En este último, los datos están distribuidos en una red de canales y planos donde se describen sus características morfológicas, y variables hidrológico-erosivas.

En las plantillas que proporciona el programa, todos los datos son leídos por lo que el orden no es crucial, pero es imprescindible que haya un espacio y que se introduzca un dato por variable. Es importante no borrar ni modificar las cabeceras de las líneas, ya que el modelo puede dar errores en su ejecución.

El usuario tiene una serie de opciones a la hora de elegir los valores de las variables de los ficheros de entrada. Estos valores dependen en gran medida de la experiencia hidrológica y del conocimiento de la cuenca.

### **2.6.2.3.-Edición de los datos de entrada**

Para poder editar los ficheros con la información de nuestra cuenca de estudio podremos emplear el bloc de notas de Windows. Solo se deben reemplazar los valores de entrada del programa. Los nombres de cada variable son solo una guía para el usuario, pero no deben de ser borrados o alterados.

#### ***Fichero de datos pluviométricos:***

Parámetros que hay que introducir en el fichero de datos pluviométricos:

- **NGAGES:** número de pluviómetros que hay en la cuenca.
- **MAXND:** número total de pares de datos “tiempo-precipitación acumulada” usados para describir la tormenta.

Esta información es usada para describir la tormenta por medio de la definición del tiempo (*TIME*; min) de comienzo de cada periodo en la tormenta y la lluvia acumulada en dicho período (*ACCUM. DEPTH*; mm). Cada entrada se considera un par de datos “tiempo-precipitación acumulada”. El número de pares de datos debe tener una extensión lo suficientemente larga para que sobrepase el (*TFIN*), durante el cual el programa va a operar. El valor de *TFIN* dependerá de la duración del evento y de la respuesta de la cuenca a dicha precipitación. Debe ser lo suficientemente largo como para que abarque el hidrograma de escorrentía, por lo que comenzará con la lluvia y terminará cuando cese la escorrentía.

- **ELE.NUM (J):** Cada cuenca está representada por un conjunto de elementos los cuales necesitan ser identificados en el modelo y por tanto deben de ser numerados. Por lo tanto, este parámetro se refiere al número que se le asigne a cada elemento.
- **RAINGAUGE:** número de pluviómetros disponibles en la cuenca a los que se asocian los elementos.
- **WEIGHT:** variable que permite ponderar los datos de lluvia de los pluviómetros por medio de un factor en base a la distancia que exista al elemento.

- **ALFA-NUMERIC IDENTIFICATION:** nombre con el cual se identifica la lluvia registrada en el pluviómetro. Hay que asegurarse que la extensión del nombre no sobrepase la extensión de la línea.
- **TIME-ACUMM.DEPTH PAIRS:** número de pares de datos registrados. Los datos para cada par, fueron introducidos comenzando en el tiempo cero y la lluvia acumulada del primer periodo de tiempo. Hay que comprobar que el valor del tiempo del último par de datos, sobrepasa el tiempo de computación del modelo (*TFIN*).

**Fichero de características de la cuenca:**

Una vez que se divide la cuenca en sus planos y canales en forma de cascada, hay que introducirlo en el fichero de datos, el cual está estructurado en cuatro apartados: *SYSTEMS*, *OPTIONS*, *COMPUTATION ORDER* y *ELEMENT WISE INFO*.

**SYSTEMS:**

- **NELE:** número total de elementos de la cuenca. Este valor debe coincidir con el que se ha introducido en el archivo de precipitación (*ELE.NUM.(J)*)
- **CLEN:** longitud característica del flujo superficial y representa la longitud más larga de la serie de los planos en cascada o de los canales.

Unidades: metros

- **TFIN:** tiempo que durará la computación. Este tiempo tiene que ser menor que el último par de datos tiempo-precipitación acumulada del fichero pluviométrico.

Unidades: minutos

- **DELT:** incremento del tiempo usado en la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales. Lo ideal sería que este tiempo fuese lo más corto posible. Sin embargo, el número total de pasos, definidos como *TFIN/DELT* no debería exceder 1.000 ya que el modelo podría bloquearse.

Unidades: minutos



- **THETA:** factor de ponderación usado en la resolución de las ecuaciones diferenciales por diferencias finitas para la distribución del flujo superficial y el flujo en canales. Este valor debe de estar entre 0,5 y 1,0. Si existen choques cinemáticas en la cuenca, el valor **THETA** se aproximará más a 1,0 y se tomará como valor recomendado 0,8. En caso que no existan, se recomiendan valores aproximados a 0,5.
- **TEMP:** Temperatura del aire al comienzo de la tormenta. El modelo lo emplea para calcular la viscosidad del agua.

Unidades: °C

#### **OPTIONS:**

- **NTIME:** variable que controla las unidades de tiempo; 1 en segundos y 2 en minutos. Se usará un 2 en la presente versión de EUROSEM.
- **NEROS:** activa la opción erosiva del modelo. Cuando se introduce como valor 0 o 1, el modelo trabaja solo con la hidrología. Debemos introducir 2 para activar la opción erosiva.

#### **COMPUTATION ORDER:**

En dicho apartado debemos describir el orden en el que están definidos los elementos en el modelo de cascada.

- **NLOG:** denota el orden secuencial en la que se ejecutarán los elementos.
- **NUM(J):** número del elemento correspondiente a la entrada de la secuencia. El total de elementos de la lista debe de ser el mismo que el que ha sido introducido bajo la variable ELE. NUM(J) en el fichero pluviométrico así como en la variable NELE.

#### **ELEMENT WISE INFO:**

En este apartado se introducirán los parámetros que definen la cuenca:

- **J:** define el número de cada elemento.

- **NU:** número del plano que contribuye con escorrentía o sedimentos en el límite superior aguas arriba.
- **NR:** esta entrada se le aplica sólo a los canales, denota el número del plano que contribuye con su flujo en la parte derecha del canal mirándolo aguas arriba.
- **NL:** es el mismo concepto que el anterior pero haciendo referencia a la parte izquierda mirándolo aguas arriba.
- **NC1:** se aplica a canales y denota el número del primer canal que contribuye con su flujo aguas arriba del canal en el que estamos. Para los planos, NC1 vale cero.
- **NC2:** se aplica a canales y denota el número del segundo canal que contribuye con su flujo aguas arriba del canal en el que estemos, para los planos será 0.
- **NPRINT:** Esta variable controla la cantidad de información contenida e el fichero auxiliar de salida. Se utiliza el valor 1 para denegar información detallada y 2 para confirmar.
- **XL:** longitud del elemento.

Unidades: metros

- **W:** anchura del elemento. Para los canales es 0.

Unidades: metros

- **S:** Pendiente media de todos los surcos del elemento, medidos en la dirección de la máxima pendiente. Para elementos que no tenga surcos se introduce un valor 0 y para los canales 0,01.

Unidades: m/m

- **ZR:** pendiente del talud derecho del canal. Se expresa en forma de  $1/ZR$ . Para los planos se introduce 0.
- **ZL:** lo mismo que ZR pero aplicado al lado izquierdo.
- **BW:** Anchura del lecho del canal asumiendo que es de forma trapezoidal.

Unidades: metros

- **MANN(RL):** hace referencia al valor de una superficie rugosa, expresado mediante la  $n$  de Manning, de los surcos de los planos.

Unidades:  $m^{1/6}$

- **MANN(IR):** hace referencia al valor de una superficie rugosa, expresado mediante la  $n$  de Manning, para un plano que no contenga surcos, para el área entre surcos de un elemento.

Unidades:  $m^{1/6}$

- **FMIN:** conductividad hidráulica saturada del suelo. El valor que se introduce es el valor del suelo sin contenido de rocas o plantas.

Unidades:  $m^{1/6}$

- **G:** capilaridad efectiva del suelo.

Unidades: milímetros

- **POR:** porosidad de suelo.

Unidades: %v/v

- **THI:** contenido inicial de humedad en el suelo al inicio de la tormenta. Su valor se encuentra entre los límites de saturación residual y máxima del suelo.

Unidades: %v/v

- **THMAX:** máxima cantidad de humedad que puede tener el suelo.

Unidades: %v/v

- **ROC:** proporción del suelo ocupado por piedras o rocas. En el caso de que en la variable FMIN ya se haya tenido en cuenta el contenido de rocas del suelo será 0.

Unidades: %v/v

- **RECS:** factor de recesión de la infiltración y se define como la diferencia máxima de altura de microrelieve local. Se representa como la altura del agua que alcanza la lámina cuando cubre la superficie.

Unidades: milímetros

- **DINTR:** máxima capacidad de interceptación por parte de la cubierta vegetal.

Unidades: milímetros

- **DEPNO:** número medio de surcos que hay en un plano por cada metro de anchura.
- **RILLW:** anchura media de los surcos. Para canales se introduce el valor 0.

Unidades: metros

- **RILLD:** profundidad media de los surcos. Para canales se introduce el valor 0.

Unidades: metros

- **ZLR:** pendiente media de los taludes del surco. Para canales se introduce el valor 0.
- **RS:** opción en la cual se especifica si la anchura y la profundidad del surco son uniformes o se incrementan pendiente abajo. Un valor RS=0 indicará que los surcos son uniformes pendiente abajo.
- **RFR:** la rugosidad del terreno determinada pendiente abajo en la dirección del flujo y expresada en proporciones.
- **SIR:** pendiente media del área entre surcos. Para planos sin surcos es la pendiente media del plano y para canales es la pendiente media del canal.

Unidades: m/m

- **COVER:** proporción del terreno ocupado por vegetación, el valor se encontrará entre 0 y 1.

- **SHAPE:** hace referencia a la forma de las hojas de la vegetación presente en la cuenca. Es una relación entre el diámetro de la hoja y el tamaño medio de las gotas de agua. Se dará el valor uno para gramíneas y 2 para especies de hoja ancha.
- **PLANGE:** ángulo medio que forma el tallo de las plantas con la superficie del suelo.

Unidades: grados sexagesimales

- **PBASE:** porcentaje de área basal cubierta de vegetación expresada como proporción entre 0 y 1.
- **PLANTH:** altura media de la vegetación.

Unidades: centímetros

- **DERO:** profundidad a la que se encuentra la primera capa no erosionable.

Unidades: metros

- **ISTONE:** valor que indica la implicación de los fragmentos de roca en la infiltración. Será +1 cuando las rocas protegen al suelo de los impactos de lluvia; en cambio, será -1 cuando las rocas reducen la infiltración.
- **D<sub>50</sub>:** tamaño medio de las partículas del suelo obtenido por el método USDA. Esta comprendido entre 20-400µm.

Unidades: µm

- **EROD:** Capacidad de la gota de agua de separar el suelo por cada Julio de energía.

Unidades: g/J

- **SPLTEX:** valor del exponente que relaciona la separabilidad de las partículas del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia con la profundidad de la capa de agua que cubre la superficie del suelo. Dicha versión toma un valor constante de 2,0.

- **COH:** Cohesión del suelo medido por un Torvane una vez que el suelo se encuentra en saturación.

Unidades: kPa

- **RHOS:** gravedad específica de las partículas del sedimento.

Unidades: Mg/m<sup>3</sup>

- **PAVE:** proporción de terreno ocupado por material no erosionable.
- **SIGMAS:** la desviación estándar de los diámetros de las partículas del suelo para cualquier elemento aguas arriba de un embalse. En la presente versión no se emplea.
- **MCODE:** esta opción nos dará la oportunidad de elegir entre dos formas de calcular la capacidad de transporte de sedimentos por el flujo entre surcos. Si ponemos *MCODE=1* corre el modelo empleando las ecuaciones propuestas por Everaert (1992) y *MCODE=0* emplea las ecuaciones propuestas por Govers (1990).

### 2.6.3.- Salidas del programa

Tras correr el modelo con el fichero pluviométrico y con el paramétrico se nos generan tres archivos de salida: dinámico, estático y auxiliar.

#### Fichero de salida dinámico:

Al inicio de este fichero se nos muestran los nombres *a.par* y *b.pcp* de los archivos de entrada. Después, se nos muestra el título descriptivo del fichero de salida. Aquí, se nos resumirá lo que ocurre en cada elemento. En cada uno de ellos aparece el error del balance y también se nos indica si se trata de un plano o un canal, así como el número del elemento.

En cada elemento los datos se encuentran distribuidos en columnas, la primera es el tiempo de duración del evento acompañado por otra columna que nos dará información sobre la lluvia en mm/h. Las dos siguientes serán las que formarán el hidrograma en la salida, la primera en m<sup>3</sup>/min y la segunda en mm/h. A su vez, la información necesaria para realizar el sedimentograma se nos dará en la última columna en kg/min.

Por último el modelo nos facilitará un resumen del evento. Primero nos pondrá cual ha sido la lluvia total (mm), después el área total de la cuenca y por último un resumen del balance de agua:

- Almacenamiento en los planos.
- Almacenamiento en canales.
- Almacenamiento en embalses.
- Infiltración total en todos los planos.
- Escorrentía total en toda la cuenca.
- Suma del agua almacenada, infiltrada y de escorrentía.

Por último, consta el balance del error total de la cuenca.

#### Fichero de salida estático

En éste, se nos da la información sobre la cuenca de estudio y una lista de las entradas usadas en la simulación. También se nos dice como obtiene la  $n$  de Manning para las áreas entre surcos que calcula el modelo mediante los valores introducidos de *IRMANN* y *RFR*. Asimismo, muestra un resumen de la erosión y deposición ocurrido en la tormenta separando la ocurrida en los surcos respecto a la ocurrida entre los surcos.

#### Fichero de salida auxiliar

Aquí se hace un resumen detallado de la lluvia total (*RAIN*), de la lluvia directa (*TFALL*), del drenaje foliar (*DRIP*), la interceptación (*VEGSTORE*) y el flujo estancado (*STEM*) y la energía cinética de las gotas de agua. También aparece de forma detallada el balance de sedimentos que ocurre en cada elemento; la cantidad de sedimento erosionado (*eros*), las entradas de sedimento al elemento (*susp*) y sus correspondientes salidas del elemento (*sedout*). Por otro lado, nos aportará los valores iniciales de los surcos y los finales después de la tormenta, así como de las áreas entre surcos. Finalmente, nos indica el total de la superficie erosionada y un balance de agua referente al final de la tormenta.

## 2.7.- Obtención de los parámetros reales de entrada del modelo

Como ya se indicó oportunamente, la principal novedad de esta investigación consiste en la (re)evaluación del modelo EUROSEM a través del reemplazo de ciertos valores de entrada del mismo -hasta el momento sólo estimados mediante el uso de tablas, principalmente- por otros ahora recabados en campo mediante experimentación ad hoc (Tabla 2.7.1).

**Tabla 2.7.1.- Variables de entrada de EUROSEM cuyos valores fueron determinados en campo en La Tejería y Latxaga, para una selección de eventos.**

Variable estimada en campo	Unidades	En EUROSEM
Conductividad hidráulica en saturación, $K_s$	mm/h	<i>FMIN</i>
Humedad del suelo antes del evento	%	<i>THI</i>
Máximo contenido de humedad en el suelo	%	<i>THMAX</i>
Energía cinética de la gota de	g/J	<i>EROD</i>
Cohesión del suelo en saturación	kPa	<i>COH</i>
Rugosidad del terreno	cm	<i>RFR</i>
Factor de recesión de la infiltración	mm	<i>RECS</i>
Porosidad	%	<i>POR</i>

A continuación, se darán algunos detalles metodológicos aclaratorios:

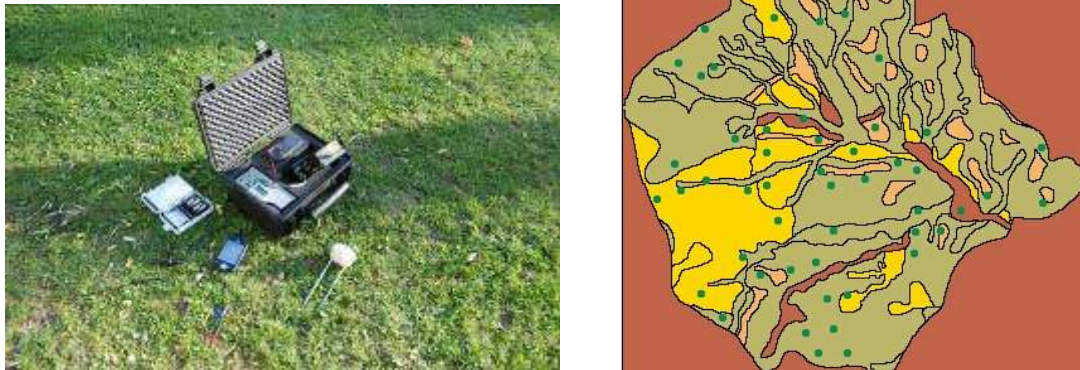
La conductividad hidráulica en saturación ( $K_s$ ) fue determinada, en realidad, como la diferencia entre la precipitación y la escorrentía registrada en cada parcela experimental. De esta manera, se asumió que los valores de infiltración final o básica correspondían al valor  $K_s$  buscado. Se trabajó con valores promedios de las diferentes repeticiones.

Por otro lado, la humedad edáfica antes del evento se obtuvo, en la Tejería, a partir de registros periódicos de humedad (TDR) obtenidos por el grupo de investigación. Entre noviembre de 2009 y junio de 2010 se colocaron 43 sondas TDR (Fig. 2.7.1) en toda la cuenca de La Tejería (Fig. 2.7.1) a una profundidad aproximada de 20 cm. Durante los meses de registros, el suelo llegó a alcanzar estados de -o próximos a- saturación, con lo cual se pudo también determinar, así, la máxima capacidad de retención edáfica.

En el caso de Latxaga no se disponía de similares lecturas (TDR), con lo cual se usó la información brindada por el SITNA (<http://cuencasagrarias.navarra.es>), con la asumida limitación de contar con un único valor de humedad para toda la cuenca. Ahora bien, si las mediciones realizadas a campo en las diferentes fechas de experimentación



hubieran resultado casualmente próximas (pocos días previos) a una de las lluvias seleccionadas, este valor de humedad sería considerado en lugar de aquel proporcionado por el SITNA



**Fig. 2.7.1.-** Equipo TDR (izq.) y sonda de humedad instalada antes de ser cubiertas (der.)

Para la determinación de la energía cinética de la lluvia se empleó la *eq. 3.1* obtenida empíricamente por Cooper (2007) a partir de un simulador de lluvia idéntico al nuestro y bajo similares condiciones experimentales.

$$KE = 0.298 \cdot \left( 1 - \frac{4.29}{I} \right)$$

(2.18)

Siendo:

*KE*: Energía cinética de la gota de lluvia ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ )

*I*: Intensidad de lluvia ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )

Con respecto a la determinación de la cohesión del suelo superficial se utilizó un aparato tipo Torvane. (Fig. 2.7.2). Previo a cada medición, la humedad del suelo era llevada a saturación pulverizando agua sobre su superficie. Se efectuaron 15 repeticiones en cada suelo.

A su vez, los valores de rugosidad (RFR y RECS) fueron los obtenidos por Larrañaga (2006) mediante el uso de un perfilador láser (Álvarez, 2006).

Finalmente, los valores de porosidad se obtuvieron a partir de la *eq. 2.19* basándose en valores de densidad aparente recabados en campo.

$$\Phi = \frac{2.65 - \rho_a}{2.65}$$

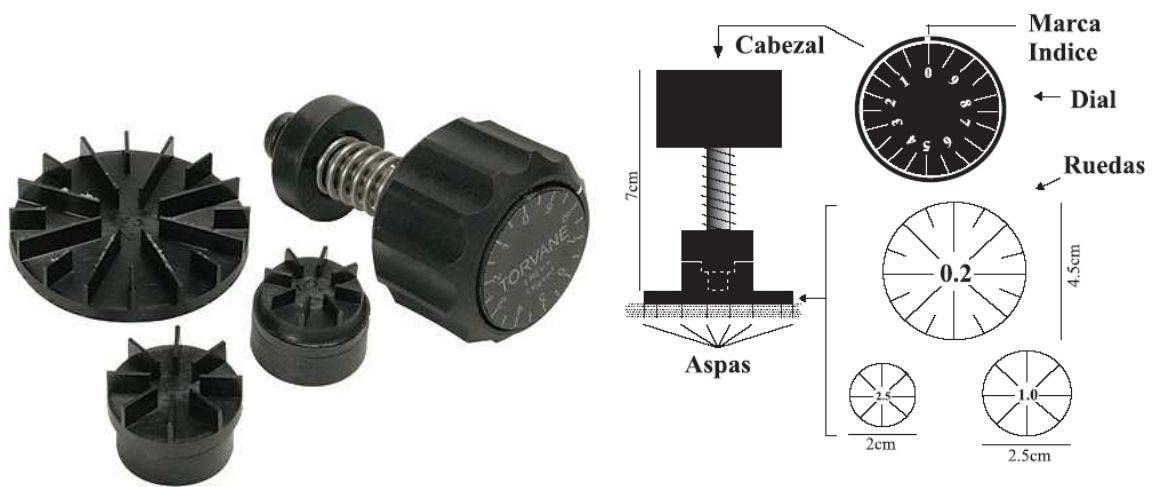
(2.19)

Siendo:

$\phi$ : Porosidad ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\rho_a$ : densidad aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

En cada cuenca, y a través del programa ArcView se determinó, en cada uno de los planos en cascada (ver arriba) el porcentaje de superficie ocupado por los diferentes tipos de suelo. Siendo que EUROSEM sólo permite asignar a cada plano, un único valor de los diferentes parámetros, se utilizó un promedio ponderado según, precisamente, los suelos predominantes.



**Fig. 2.7.2-** Equipo Torvane para la determinación de la cohesión del suelo.

### **3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

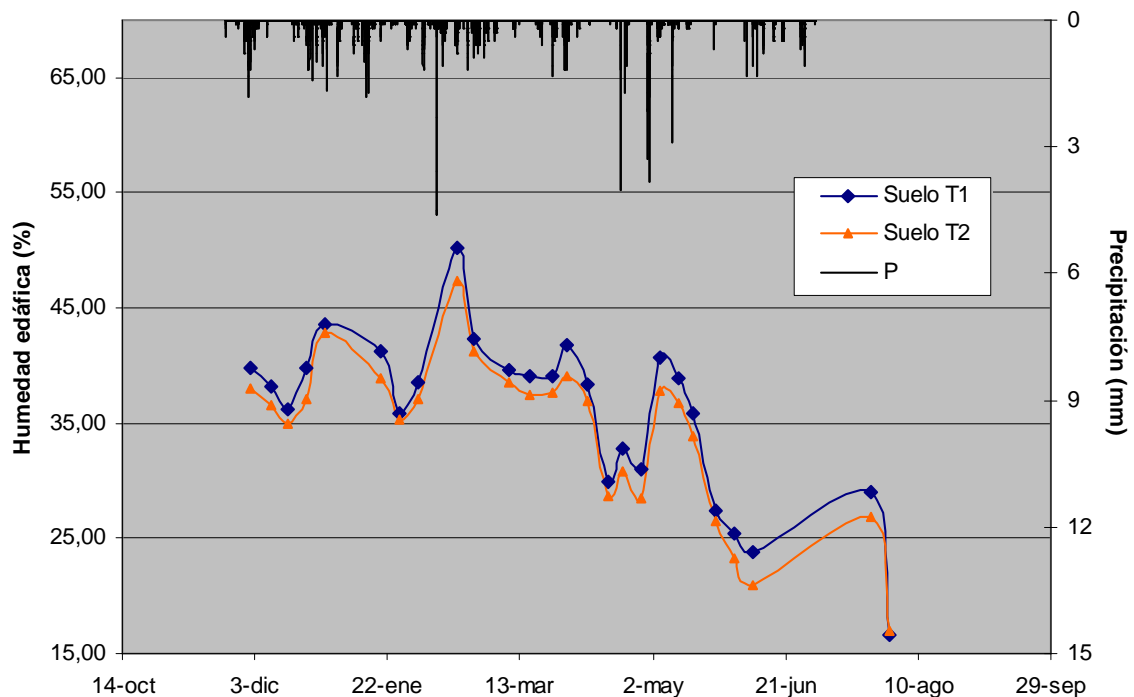
### 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1.- Experimentación en La Tejería

Tal y como se explica en la metodología, del conjunto de distintos taxones de suelos iniciales se redefinieron dos grandes grupos a los cuales se llamó “Suelo T1” y “Suelo T2”. Así, en los siguientes apartados se analizan tanto los datos de humedad edáfica obtenidos por las sondas distribuidas por la cuenca, como los ensayos realizados con el simulador de lluvia.

##### 3.1.1.- Humedad edáfica

En la Fig. 3.1.1 se muestra la evolución de la humedad de los dos suelos en las distintas fechas que se realizaron las mediciones.



**Fig. 3.1.1.-** Evolución de la humedad en los suelos T1 y T2 de La Tejería

Se observa que en el “Suelo T1” los valores de humedad son sistemáticamente mayores que en el “Suelo T2” a lo largo del tiempo. Así, la dinámica de la humedad edáfica presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre ambos suelos. Estos resultados sugieren que la determinación, de hecho arbitraria, de estos dos grandes grupos de suelos (esto es, Suelo T1 y Suelo T2), no fue desacertada.

### 3.1.2.- Variables hidrológicas

Apoyándonos en el resultado obtenido en el apartado anterior, la cuenca se divide en dos tipos de suelo. Así, en cada uno de éstos, se realizaron tres ensayos con el simulador de lluvia para ver las posibles diferencias en cuanto a escorrentía y arrastre de sedimentos; con el fin último de obtener algunos de los datos de entrada requeridos por el modelo EUROSEM.

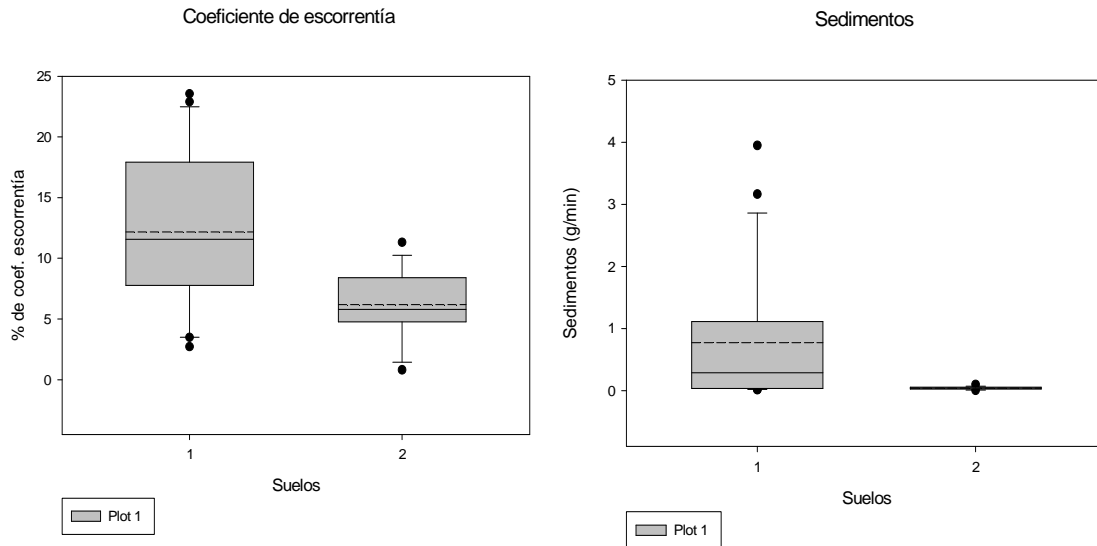
En la Tabla 3.1.1 se resumen los resultados de las variables hidrológicas y erosivas más relevantes de cada suelo obtenidos a través de los ensayos a campo.

**Tabla 3.1.1.- Variables hidrológicas y erosivas junto a su desviación típica (valores entre paréntesis).**

ENSAYOS REALIZADOS		Hidrológicos	Erosivos		
		Coef. Escorrentía (%)	Concentración (g/l)	g/m <sup>2</sup>	g/min
Suelo T1	Repetición 1	17,76 (7,6)	4,1 (1,1)	2,1 (1,4)	0,23 (0,08)
	Repetición 2	6,7 (3,0)	2,4 (1,9)	0,68 (0,5)	0,05 (0,03)
	Repetición 3	23,8 (10,3)	5,0 (1,0)	5,8 (3,3)	0,47 (0,26)
Suelo T2	Repetición 1	4,9 (2,9)	1,8 (0,32)	0,46 (0,25)	0,03 (0,02)
	Repetición 2	5,5, (1,3)	0,81 (0,68)	0,81 (0,71)	0,06 (0,03)
	Repetición 3	9,6 (4,0)	1,24 (0,12)	0,60 (0,23)	0,04 (0,02)

Agrupando los datos provenientes de cada una de las respectivas repeticiones de cada suelo, se crean los siguientes diagramas de cajas (Fig. 3.1.2) referentes al coeficiente de escorrentía y al arrastre de sedimentos en gramos por minuto. Por otro lado, en la Fig. 3.1.2 se visualiza claramente lo que se observa en la Tabla 3.1.1, es decir, la amplitud de las cajas es grande lo que pone de manifiesto que la desviación típica es elevada. Además, se observa la presencia de valores atípicos. En lo referente a las medias de los diagramas de caja (representados con una línea discontinua) se puede apreciar que son distintos en ambos suelos. En todo caso, más adelante se realiza un análisis estadístico para confirmar dichas tendencias.

Dicha dispersión en los datos respecto a la media se debería a dos razones, principalmente. Primero, durante la experimentación se observó que, debido a la manifiesta irregularidad de la superficie del suelo, propia de su rugosidad, se producían acumulaciones de aguas en micro depresiones del terreno las cuales, al interconectarse entre sí, podían generar un súbito aumento de la escorrentía; esto último a veces en coincidencia con el momento de recogida de una muestra de agua y sedimento (Fig. 3.1.3). En consecuencia, esto llevaba a una subestimación de la infiltración instantánea (Fig. 3.1.5).



**Fig. 3.1.2.-** Diagramas de caja para el coeficiente de escorrentía y producción de sedimentos generados por la lluvia artificial en las parcelas experimentales.

A



B



**Fig. 3.1.3.-** Secuencia de imágenes donde se muestra (A) microdepresión del terreno llena de agua (ver flecha) y (B) la misma depresión luego de un súbito (pocos segundos) vaciado del agua.

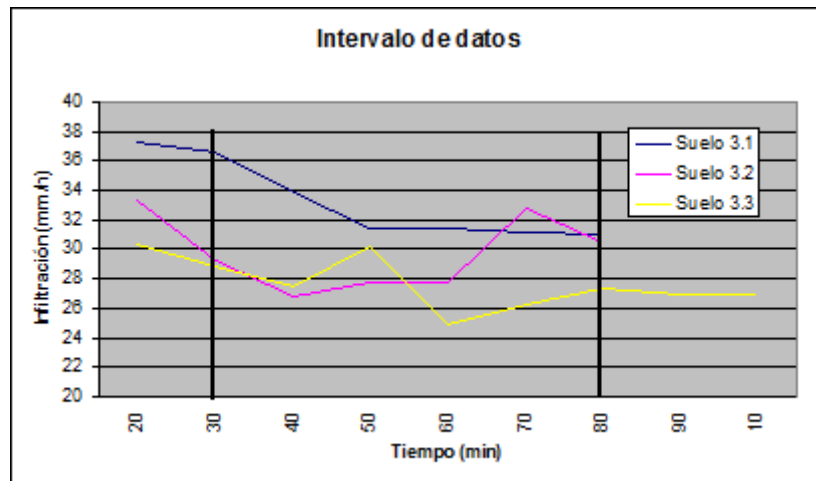
El segundo factor implicando en la dispersión de los datos es el viento. Pese a tener un cortavientos las fuertes rachas de viento podían con frecuencia hacer que el volumen de lluvia caído en la parcela de ensayo fuera irregular (Fig. 3.1.4).





**Fig. 3.1.4.-** Cortavientos empujado por fuertes rachas de viento durante una experimentación.

A continuación, se analizarán estadísticamente los valores que han servido para crear los diagramas de cajas. Para ello, se tomarán los valores obtenidos en los intervalos de tiempo comprendidos entre 30 y 80 minutos; período en el cual en general, los valores de tasa de infiltración se vuelven aproximadamente constantes, en todas las repeticiones (Fig. 3.1.5).



**Fig. 3.1.5.-** Representación de la infiltración instantánea de 3 repeticiones y el intervalo de datos tomado para el análisis estadístico

De esta forma, los parámetros estudiados serán el coeficiente de escorrentía (porcentaje), analizado cada diez minutos, y el arrastre de sedimentos (g/min). En ambos casos existen diferencias significativas ( $p\text{-valor} < 0,05$ ), asumiendo normalidad en la

distribución de los datos. En la Tabla 3.1.2 se muestra el análisis de la varianza realizado para el coeficiente de escorrentía.

**Tabla 3.1.2.- ANOVA para el coeficiente de escorrentía.**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	20	243,3	12,1	38,9
Columna 2	18	111,3	6,1	7,8

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	339,1	1	339,1	13,9	$6 \cdot 10^{-4}$	4,1
Dentro de los grupos	872,2	36	24,2			
Total	1211,3	37				

Asimismo, en la Tabla 3.1.3 se muestran los resultados del análisis de la varianza realizado con los datos de producción de sedimentos.

**Tabla 3.1.3.- ANOVA para el arrastre de sedimentos.**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	21	16,2	0,7	1,1
Columna 2	18	0,7	0,03	0,0005

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5,2	1	5,2	8,6	0,005	4,1
Dentro de los grupos	22,2	37	0,6			
Total	27,4	38				

Los resultados contrastantes de escorrentía y erosión obtenidos mediante la experimentación antedicha, sustentan, nuevamente, la reagrupación de los suelos (Suelo T1 y Suelo T2) realizada en esta investigación. Igualmente, las mediciones de cohesión realizadas en campo mediante el uso del instrumento Torvane (Tabla 3.3.1.22) muestran diferencias significativas ( $p\text{-valor} < 0,05$ ) entre ambos tipos de suelos.



**3.1.2.1.- Infiltración básica**

Mediante los datos de escorrentía obtenidos en los ensayos con el simulador de lluvia se pueden inferir, restándoles los valores correspondientes de precipitación, la infiltración instantánea y la básica (Tabla 3.1.4).

**Tabla 3.1.4.- Infiltraciones básicas en el suelo T1 y T2**

Infiltración básica (mm/h)		
Repetición	Suelo T1	Suelo T2
1	20,4	26,5
2	33,7	30,0
3	21,5	26,5
<b>Promedio</b>	<b>23,4</b>	<b>27,6</b>

Como se aprecia en la tabla anterior existe una mayor variabilidad (ver razones arriba) en las infiltraciones medidas en el Suelo T1 respecto a las del Suelo T2.

Comparando los valores obtenidos con los valores tabulados de la F.A.O. según Roquero y Porta (1992) (Tabla 3.1.5) observamos que no existe una buena correspondencia con nuestros resultados. Según la textura medida en el laboratorio la cuenca se caracteriza por poseer un suelo franco arcilloso, con lo cual y según Roquero y Porta la infiltración básica debería rondar los  $7,5 \text{ mm.h}^{-1}$ . En cambio, nuestra experimentación arroja valores muy superiores (alrededor de  $20 \text{ mm.h}^{-1}$ ).

**Tabla 3.1.5. Valores orientativos de infiltración final según diferencias texturales (Roquero y Porta, 1992)**

Textura	Velocidad de infiltración básica ( $\text{mm/h}^{-1}$ )
Arenas gruesas	19-25,5
Arenas finas	12,5-19
Franco arenosa fina	12,5
Franco limosa	10
Franco arcillosa	7,5

Estas elevadas tasas de infiltración podrían asociarse a la presencia de grietas o macroporos en el terreno, formándose canales preferentes en el flujo del agua (Fig. 3.1.6). Precisamente, la imagen de la Fig. 3.1.6 corresponde a una experimentación realizada en el suelo 1 donde se verificó una elevada tasa de infiltración. En ella se aprecia que el color azul del colorante llega hasta los 30 cm de profundidad creando una

vía de salida para el agua dando como resultado una infiltración básica muy superior a la esperada por su textura.



**Fig. 3.1.6.-** Detalle de una vía de flujo preferencia de agua (teñido de azul) luego de una experimentación donde se registró una elevada tasa de infiltración.

Sin embargo, con esta técnica de visualización de vías de flujo preferencial no se obtuvieron resultados consistentes, a lo largo de toda la experimentación, como para para mayores precisiones. Aun así, la alta infiltración observada en los suelos en estudio y la a veces evidente presencia de macroporos (normalmente, bioporos) hace presuponer que a través un adecuado ajuste de la técnica o bien el uso de una distinta, se podrían obtener mejores resultados; esto es, ‘cuantificar’ el efecto de los macroporos en la capacidad de infiltración de estos suelos.

### **3.1.2.2.-Tasa de erosión**

En cada una de las repeticiones realizadas en cada tratamiento se determinó la tasa de erosión del suelo (Tabla 3.1.6). Así, se observa que el Suelo T1 es más vulnerable a la erosión obteniendo valores que van desde 3 g/h hasta 22,4 g/h. En el Suelo T2, en cambio, los valores son más discretos y no pasan los 5 g/h. A su vez, existe mayor variabilidad en los datos obtenidos en el Suelo T1 respecto a los obtenidos en el Suelo T2. Como se ha analizado con anterioridad, por lo general, el coeficiente de escorrentía es mayor en el Suelo T1 y es esta razón lo que hace que tengamos mayor masa de suelo erosionado.

**Tabla 3.1.6.-** Cantidad de sedimento erosionado por hora en cada suelo.

Suelo erosionado (g/h)		
Repetición	Suelo T1	Suelo T2
1	14,3	1,9
2	2,9	3,4
3	22,4	2,6
<b>Promedio</b>	<b>13,2</b>	<b>2,6</b>

### 3.2.- Experimentación en Latxaga

A diferencia de lo que ocurre en la cuenca experimental de La Tejería, en Latxaga no se cuenta con los datos de humedad edáfica proporcionados por sondas TDR.

Por otro lado, del conjunto de taxones de suelos iniciales se redefinieron tres que llamaremos “Suelo L1”, “Suelo L2” y “Suelo L3” en los que se realizará la experimentación con el simulador de lluvia para ver si existen diferencias entre sí.

#### 3.2.1.- Variables hidrológicas

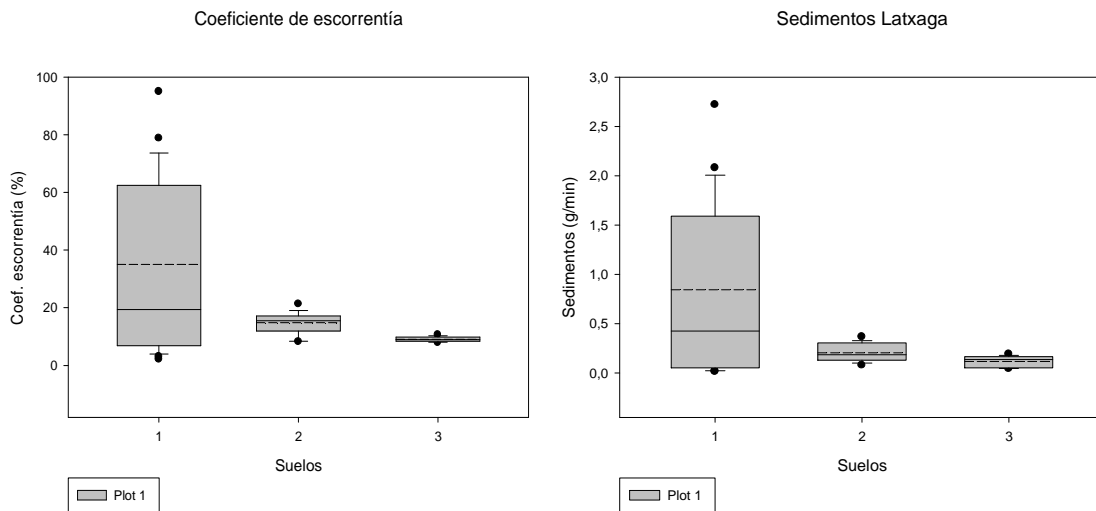
A continuación, se resumen los valores hidrológicos y erosivos más relevantes obtenidos mediante los datos aportados en los ensayos con el simulador de lluvia. Por cada suelo se realizaron, igualmente, tres repeticiones, dando como resultado los valores reflejados en la Tabla 3.2.1.

**Tabla 3.2.1.- Variables hidrológicas y erosivas junto a su desviación típica.**

ENSAYOS REALIZADOS		Hidrológicos	Erosivos		
		Coef. Escorrentía (%)	Concentración (g/l)	g/m <sup>2</sup>	g/min
SUELO L1	Repetición 1	60,8 (17,3)	4,9 (1,7)	9,7 (3,5)	1,5 (0,7)
	Repetición 2	13,9 (6,6)	6,4 (2,0)	3,2 (1,5)	0,26 (0,1)
	Repetición 3	10,1 (5,9)	2,1 (0,5)	1,1 (0,6)	0,08 (0,05)
SUELO L2	Repetición 1	24,3 (22,0)	3,2 (0,7)	3,5 (3,2)	0,28 (0,27)
	Repetición 2	15,6 (2,7)	6,3 (0,8)	4,3 (0,8)	0,31 (0,04)
	Repetición 3	18,8 (7,4)	3,7 (0,5)	2,6 (0,7)	0,2 (0,06)
SUELO L3	Repetición 1	8,5 (1,7)	3,2 (0,8)	1,8 (0,4)	0,13 (0,05)
	Repetición 2	7,9 (1,3)	1,3 (0,2)	0,6 (0,06)	0,05 (0,01)
	Repetición 3	9,8 (1,4)	4,0 (0,5)	2,1 (0,3)	0,16 (0,04)

Tal y como se realizó en el caso anterior, se crearán los diagramas de caja para cada suelo con los datos de escorrentía y arrastre de sedimentos (Fig. 3.2.1). Se observa que la dispersión de los datos respecto a la media es grande en el Suelo L1; esto puede ser debido a que la primera repetición realizada dista mucho de los dos restantes tal y como se observa en la tabla anterior.

A su vez, tal y como se comentó en el apartado referente a La Tejería, el viento y las depresiones del terreno son los factores que hacen que la desviación típica sea tan elevada.



**Fig. 3.2.1.-** Diagramas de caja para el coeficiente de escorrentía y los sedimentos

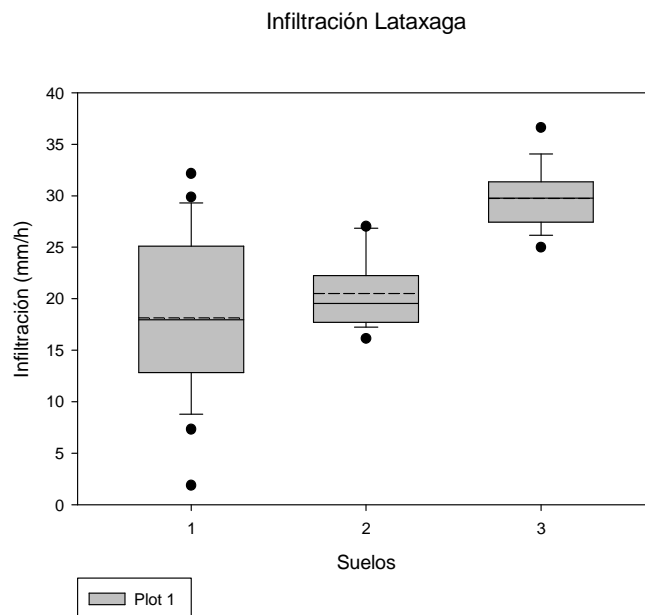
Tras realizar el análisis estadístico correspondiente para el conjunto de los datos que se recogen en los diagramas de caja anteriores se obtienen los siguientes resultados:

- No existen diferencias significativas entre los Suelos L1 y L2 en cuanto al coeficiente de escorrentía ( $p\text{-valor} > 0,05$ ).
- Existen diferencias significativas entre el Suelo L1 y L2 con el suelo L3 refiriéndonos al coeficiente de escorrentía ( $p\text{-valor} < 0,05$ ).
- En cuanto al arrastre de sedimentos existen diferencias significativas entre los tres suelos estudiados.

Por lo tanto, el Suelo L1 y L2 muestran un comportamiento hidrológico similar mientras que el suelo 3, no. Aunque en el diagrama de cajas referente al coeficiente de escorrentía no se aprecie tan bien como en el diagrama de infiltración instantánea (Fig. 3.2.2). A su vez, el comportamiento en el arrastre de materiales es distinto entre los tres suelos.

Fijándonos en los resultados reflejados en la Tabla 3.2.2.14 que hacen referencia a los valores de cohesión medidos mediante el Torvane en los distintos suelos de Latxaga se obtienen el siguiente resultado:

- No existen diferencias significativas entre el suelo 1 y 2 ( $p\text{-valor} > 0,05$ ); mientras que sí que existen diferencias entre los dos últimos y el 3 ( $p\text{-valor} < 0,05$ ).



**Fig. 3.2.2.-** Diagrama de cajas para la infiltración instantánea

### **3.2.1.1.- Infiltraciones básicas**

En la tabla 3.2.2 se recogen los valores de infiltración básica obtenidos en cada ensayo.

**Tabla 3.2.2.-** Infiltraciones básicas para cada suelo

Infiltración básica (mm/h)			
Ensayo	Suelo L1	Suelo L2	Suelo L3
1	14,9	21,2	33,7
2	18,9	20,6	30,2
3	26,4	18,5	35
<b>Promedio</b>	<b>20,1</b>	<b>20,1</b>	<b>33,0</b>

Nuevamente, los valores de infiltración básica medidos en campo son mucho más elevados que los tabulados (Tabla 3.1.5). Es así que, para la clase textural predominante en la cuenca, le corresponderían valores entorno a 7,5 mm/h, y en el Suelo L3 tenemos una infiltración hasta cuatro veces mayor.

Como era de esperar, las infiltraciones básicas del Suelo L1 y L2 son iguales, razón por la que decidimos unirlos en un único suelo, apoyándonos también en los resultados de cohesión que apoyan este criterio.

**3.2.1.2.- Tasa de erosión**

En la Tabla 3.2.3 se muestra la tasa de erosión en cada suelo. Se puede observar que en el suelo 3 la erosión es menor en correspondencia con la también menor escorrentía. Los valores del Suelo L1 y L2 son bastante similares exceptuando el ensayo 1 del suelo 1, que es el que hace que la media aumente notablemente.

**Tabla 3.2.3.- Cantidad de sedimento erosionado por hora en cada suelo**

<b>Erosión (g/h)</b>			
Ensayo	Suelo L1	Suelo L2	Suelo L3
1	69,6	16,4	7,4
2	12,9	18	2,5
3	10,2	11,4	11,5
<b>Promedio</b>	<b>30,9</b>	<b>15,3</b>	<b>7,1</b>

### **3.3.- Evaluación del modelo EUROSEM para la estimación de escorrentía y producción de sedimentos**

Evaluar un modelo consiste en realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros involucrados, una calibración mediante la modificación de los valores de aquellos parámetros más sensibles, y finalmente una validación para determinar la fiabilidad del modelo. Esta última, a través de una simulación utilizando datos de entrada que no participaron en la calibración.

En este caso, la evaluación se llevó a cabo en las cuencas de La Tejería y Latxaga. En rigor, se realizó una doble evaluación. La primera, siguiendo los criterios (y mediciones) propuestos por Díez (2007). Y una segunda evaluación, siguiendo el protocolo convencional pero incorporando valores experimentales recabados in situ (novedad de esta investigación).

Cabe destacar que en este caso sólo se procedió a la calibración del modelo. No se realizó un análisis de sensibilidad ya que se contaba con esta información de trabajos anteriores: La Tejería, Díez (2007) y Latxaga, Larrañaga (2006). Por otro lado, el limitado número de eventos disponibles para la evaluación hacía impracticable su correcta validación; además de no considerarse esta última relevante para los objetivos perseguidos.

#### **3.3.1.- Caso de estudio: La Tejería**

##### **3.3.1.1.- Eventos seleccionados**

Para realizar la selección de eventos nos hemos ceñido al periodo hidrológico comprendido entre el 1 de diciembre de 2009 hasta el 6 de junio de 2010. La razón de movernos entre estas fechas es debido a la colocación de las sondas de humedad en la cuenca que nos aportarán los datos sobre humedad edáfica.

Para obtener los eventos se han seguido dos criterios. Primero, hace falta una precipitación significativa como para que haya escorrentía a la salida de la cuenca y se genere un pico de caudal; en segundo lugar, se han elegido los eventos acaecidos poco después de haberse realizado una medición de humedad en campo para obtener de esta forma la humedad precedente del suelo (*THI*) para incluirlo cuando se haga la simulación con los valores reales medidos a campo.

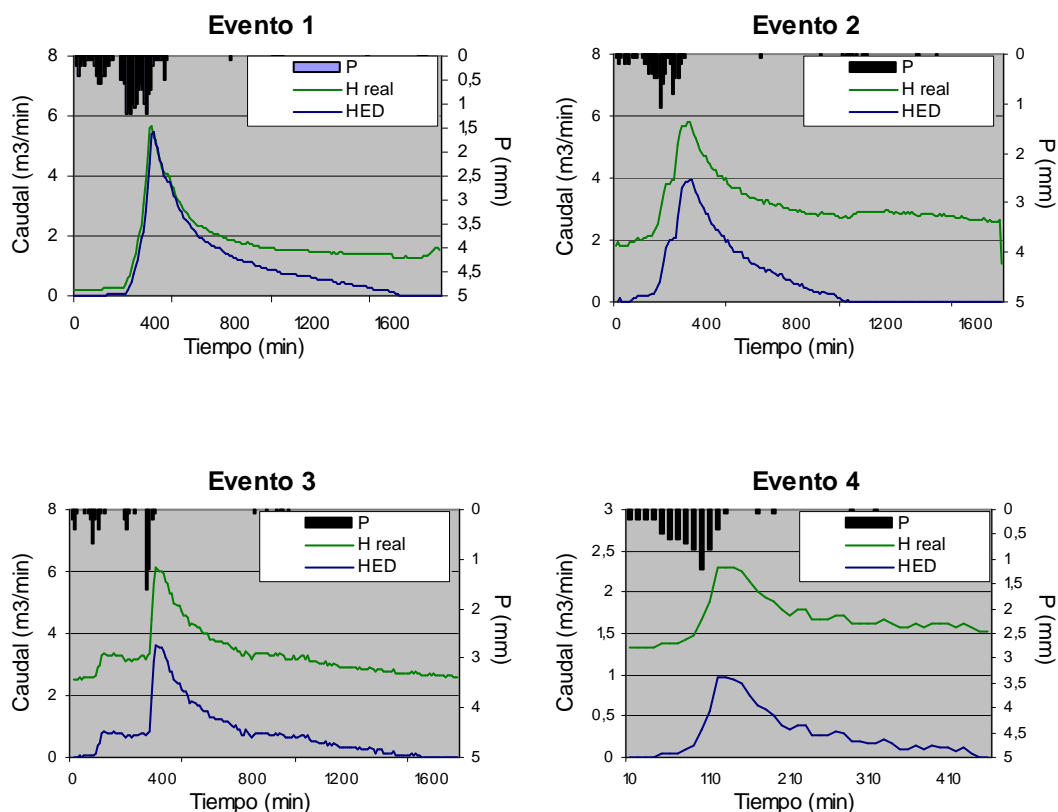
En la siguiente tabla (Tabla 3.3.1.1) se recogen los eventos que cumplen los criterios anteriores.

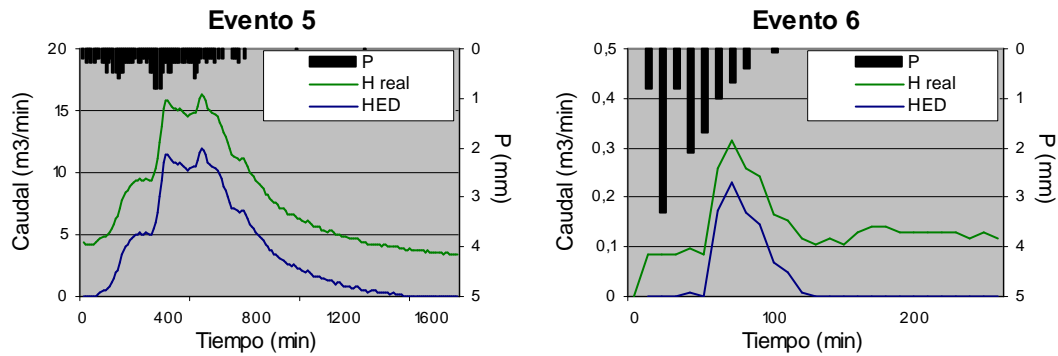


**Tabla 3.3.1.1.- Fecha de los eventos seleccionados y de registro de humedad antecedente junto con la precipitación acumulada.**

Evento	Fecha evento	Fecha medición de humedad	Precipitación (mm)
1	23/12/2009	22/12/2009	23,2
2	28/12/2009	22/12/2009	10,3
3	13/01/2010	29/12/2009	47,3
4	04/02/2010	02/02/2010	7,0
5	17/02/2009	17/02/2010	22,8
6	29/04/2010	27/04/2010	10,9

Los eventos seleccionados se muestran a continuación, junto con la precipitación (Fig 3.3.1.1). Como se dijo con anterioridad EUROSEM es un modelo que trabaja sin el flujo base por lo que se representa el hidrograma real y el hidrograma de escorrentía directa. De esta forma, los hidrogramas de escorrentía directa se cotejarán con los hidrogramas resultantes de las simulaciones del modelo.



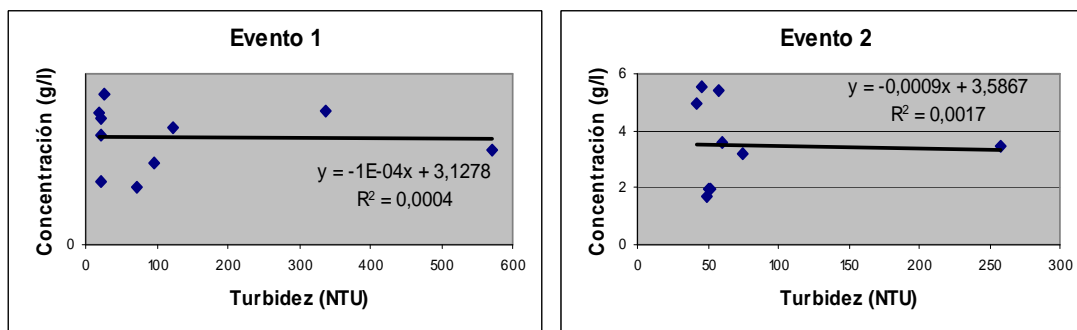


**Fig. 3.3.1.1.-** Hidrograma real e hidrograma de escorrentía directa de los eventos seleccionados.

Para obtener los sedimentogramas reales se representarán los datos de concentración de sedimentos frente a los datos de turbidez tomados a la misma hora con el fin de crear rectas de regresión con un buen ajuste. Después, en dichas rectas se introducirán los datos de turbidez diezminutales para crear los sedimentogramas.

Uno de los tomamuestras recoge el agua de escorrentía a las 3:00, 9:00, 15:00 y 21:00. En la Figura 3.3.1.2 se muestran las rectas obtenidas para cada evento.

Como se puede observar, la mayoría de las rectas obtenidas no tienen un buen coeficiente de regresión, salvo el evento 3 y el evento 5. Esto puede ser debido que el resto de eventos generan hidrogramas de caudal punto muy bajo ( $0,3\text{-}6\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ) por lo que es posible que no se haya generado escorrentía suficiente para producir una cantidad mínima significativa de sedimento. En cambio, en el evento 3 y 5, los hidrogramas son de mayor magnitud ( $16\text{ y }30\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$  de caudal punta) y los coeficientes de regresión correspondientes mejoran, precisamente, en forma significativa.



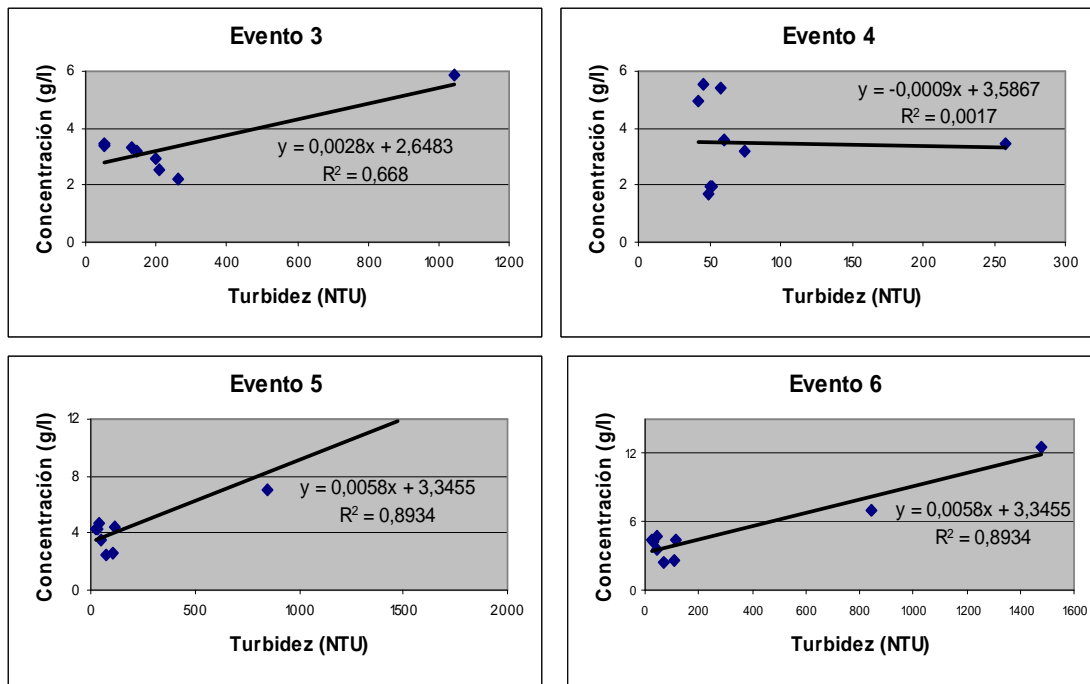


Fig. 3.3.1.2.- Relación concentración de sedimentos- turbidez y rectas de ajuste.

Ya que con los datos anteriores provenientes del turbidímetro no se obtuvieron resultados favorables para confeccionar el sedimentograma, se recurrió a muestras de sedimentos tomadas con el muestreador de avenidas (Fig 3.3.1.3).

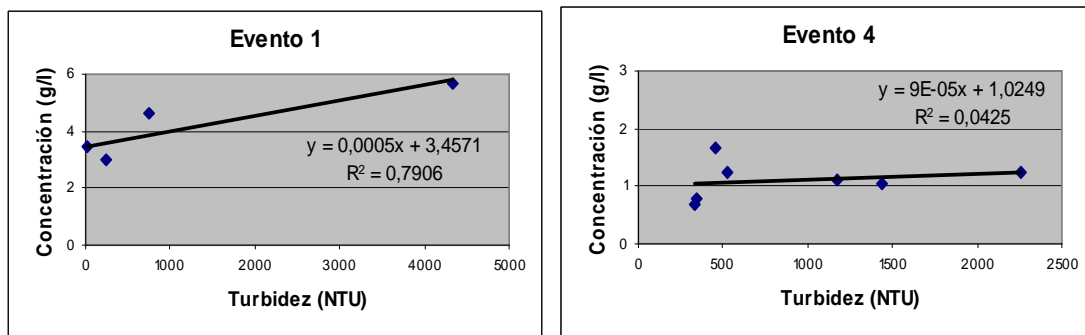
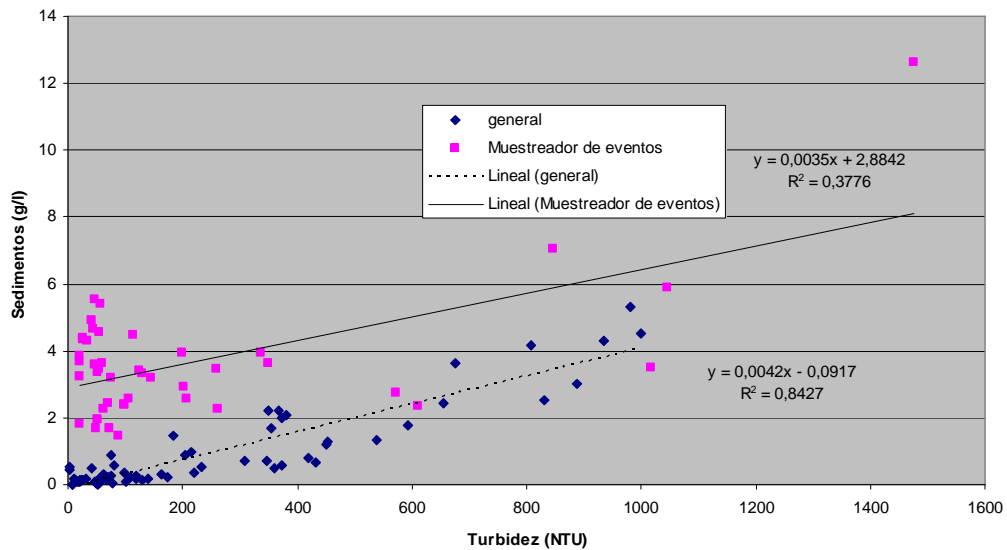


Fig. 3.3.1.3.- Rectas de concentración y turbidez con datos provenientes del muestreador de avenidas.

Para el resto de eventos no se han podido obtener regresiones significativas puesto que no se poseen lecturas de turbidez, debido a que el turbidímetro no ofrece lecturas superiores a los 4000 NTU en algunos casos, y en otros no se activó ya que no detectó una crecida importante. Así, para el evento 1 conseguimos una  $R^2$  de 0,79; en cambio, para el evento 4 es de 0,04.

Al no contar entonces con rectas de regresión adecuadas para todos los eventos, se recurrió a una recta general creada con los pares de concentraciones de sedimentos con sus correspondientes valores de turbidez creada a partir de datos del 2000 hasta el

2007. Junto a dicha recta general se representará otra recta correspondiente a los datos recogidos en nuestro periodo hidrológico (Fig.3.3.1.4).



**Fig 3.3.1.4.- Recta general 2000-2007 y recta datos 2009-2010**

Aunque la pendiente de ambas rectas es similar emplearemos la general, ya que tiene un coeficiente de regresión de  $R^2=0,8$ , en cambio la otra posee una  $R^2=0,37$ . Así, la ecuación empleada será  $y = 0,042x - 0,0917$  donde en la x introduciremos la turbidez diezminutal para obtener la concentración de sedimentos diezminutal para crear el sedimentograma. En la figura 3.3.1.8 se muestran los sedimentogramas reales junto al simulado (no existe para el evento 5 ya que no se cuenta con datos de turbidez).

### 3.3.1.2.- Estimación de parámetros y variables (según Larrañaga, 2006)

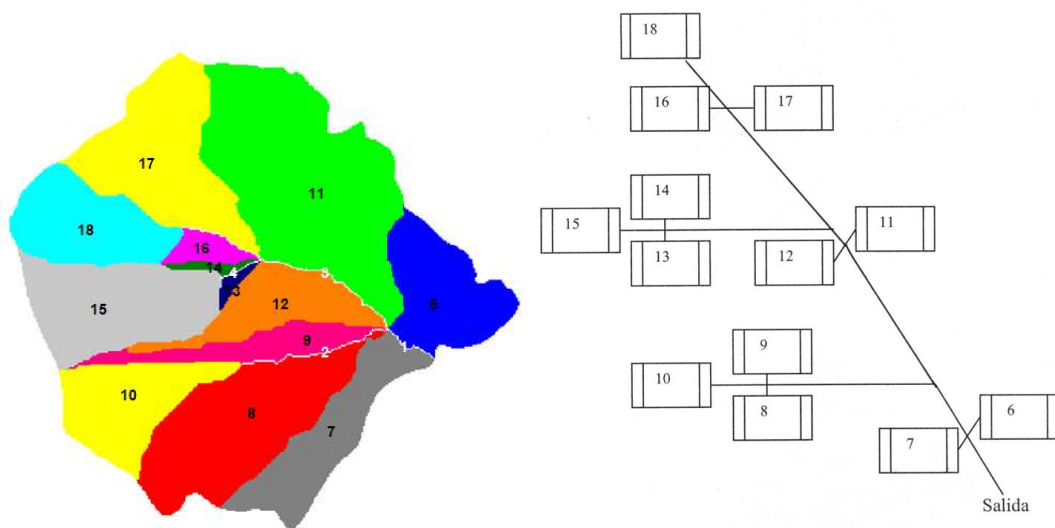
En este apartado se realizará un pequeño resumen de los parámetros de entrada que se incluirán en el modelo calculado a partir de tablas y fórmulas empíricas procedentes de trabajos anteriores.

Los parámetros de entrada del modelo se pueden dividir en cuatro grupos diferentes, y son los siguientes:

- Parámetros geométricos de la cuenca
- Parámetros hidráulicos de la cuenca
- Parámetros de erosión
- Parámetros relacionados con la vegetación

#### 3.3.1.2.1.- Parámetros geométricos de la cuenca

Para poder empezar a trabajar con EUROSEM hace falta realizar una división de la cuenca en planos y canales. Este proceso se realizó en un trabajo anterior (Amezkueta, 2002), y el resultado obtenido se muestra en la Figura 3.3.1.5.



**Fig. 3.3.1.5.- Planos y canales de La Tejería (izq.) y sistema simplificado de planos y canales en forma de cascada (der.).**

Así, mediante una simplificación geométrica de la cuenca se pueden obtener los parámetros geométricos más relevantes requeridos por el modelo resumidos en la Tabla 3.3.1.2.

**Tabla 3.3.1.2.- Parámetros geométricos del fichero de entrada de EUROSEM**

Variable	Definición	Dimensiones
<b>J</b>	Número del elemento correspondiente a cada entrada en la secuencia	adimensional
<b>NELE</b>	Número de elementos que posee la cuenca	adimensional
<b>NU</b>	Número del elemento que contribuye con escorrentía y sedimentos en el límite aguas arriba	adimensional
<b>NR</b>	Se aplica a canales y denota el número del plano cuyo flujo contribuye al canal en el lado derecho en la dirección del flujo	adimensional
<b>NL</b>	Similar al anterior pero en el lado izquierdo	adimensional
<b>NC1</b>	Se aplica a canales y denota el número del primer canal que contribuye con su flujo aguas arriba	adimensional
<b>NC2</b>	Número del segundo canal que contribuye con su flujo aguas arriba	adimensional
<b>XL</b>	Longitud del elemento	m
<b>W</b>	Anchura del plano	m
<b>S</b>	Pendiente de los surcos si existen	m/m
<b>SIR</b>	Pendiente del elemento	m/m
<b>ZR</b>	Pendiente lateral derecha del canal, asumiendo que tenga forma trapezoidal	1/ZR
<b>ZL</b>	Pendiente lateral izquierda del canal, asumiendo que tenga forma trapezoidal	1/ZL
<b>BW</b>	Anchura del lecho del canal, asumiendo que tiene forma trapezoidal	m

Las dimensiones de los planos y canales (Tabla 3.3.1.3) se obtienen del trabajo de Amezkua (2002).

**Tabla 3.3.1.3.- Datos geométricos de longitud (XL), anchura (W) y pendiente (S).**

Elemento	XL (m)	W (m)	S (m/m)
1	196,0		0,050
2	596,0		0,100
3	583,0		0,057
4	167,0		0,091
5	328,0		0,066
6	603,7	215,9	0,114
7	977,7	131,6	0,116
8	857,2	259,4	0,113
9	625,3	104,9	0,114
10	748,3	168,1	0,107
11	853,4	422,6	0,098
12	790,1	126,5	0,108
13	150,2	44,6	0,144
14	250,3	30,7	0,121
15	796,9	224,2	0,108
16	204,3	112,6	0,127
17	796,8	251,5	0,079
18	657,8	195,8	0,125

En la tabla 3.3.1.4., se representan los valores de anchura y talud de los canales (Amezkua, 2002).

**Tabla 3.3.1.4.- Datos geométricos de anchura y talud de canales.**

Canal	Anchura (m)	Talud
1	2,00	0,33
2	0,75	0,25
3	1,75	0,31
4	0,50	0,50
5	1,20	0,21

Una vez completada la caracterización de parámetros geométricos, se construye el esquema simplificado de planos y canales en cascada (Fig. 3.3.1.5). A partir de ese esquema, se determinará el conjunto de variables que se encargan de definir con precisión la situación y el orden de los elementos en el sistema simplificado de planos y canales en cascada. El conjunto de variables que se encargan de definir la situación y el orden de los elementos son: *NELE*, *NU*, *NR*, *NL*, *NC1* y *NC2* (Tabla 3.3.1.2). Los elementos del 1 al 5 hacen referencia a canales, mientras que el resto son distintos planos de la cuenca.

### 3.3.1.2.2.- Parámetros hidráulicos de la cuenca

Son parámetros hidrológicos de la cuenca las siguientes variables:

- *n* de Manning
- Capilaridad efectiva (*G*)
- Porosidad (*POR*)
- Conductividad hidráulica en saturación (*Ks* o *FMIN*)
- ***n* de Manning**

La *n* de Manning se calcula a partir de los valores de los factores que afectan la rugosidad de los planos de flujo y los canales. Los valores de *n* de Manning asignados a los canales definidos anteriormente se detallan en la Tabla 3.3.1.5 (Larrañaga, 2006).

**Tabla 3.3.1.5.- Valores de los coeficientes de *n* de Manning para los canales de La Tejería**

nº de canal	<i>n</i> de Manning
1	0,109
2	0,055
3	0,109
4	0,055
5	0,055

Los valores de rugosidad de planos y canales deben ser calculados por separado ya que las características físicas y vegetativas pueden variar significativamente. Los valores que se han aplicado para los planos son los obtenidos a partir de tablas que relacionan el cultivo y la época con la  $n$  de Manning (véase la Tabla A.2.1 en la sección de anexos). Siendo que el periodo hidrológico de estudio está comprendido entre noviembre y abril y que en esa época la cuenca está sembrada de trigo, optaremos por un valor de  $n = 0,119$ .

- **Capilaridad efectiva (G)**

La capilaridad efectiva es uno de los parámetros de infiltración que emplea el modelo. Ésta puede ser estimada a partir de las características hidráulicas del suelo, es decir, conociendo la clase textural, se puede estimar la capilaridad efectiva  $G$  según Woolhiser *et al*, 1990 (Tabla A.2.2 en Anexos). Finalmente, superponiendo el mapa de suelos con el mapa de planos y canales de la cuenca se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 3.3.1.6.

**Tabla 3.3.1.6.- Capilaridad efectiva para cada plano**

Elemento	Media ponderada de $G$
6	774,081
7	807,606
8	796,009
9	801,498
10	805,146
11	768,642
12	785,446
13	792,974
14	581,010
15	743,276
16	680,225
17	736,452
18	732,888

- **Porosidad**

La porosidad de los suelos de las cuencas se obtiene a partir de la textura y contenido en materia orgánica, parámetros que aparecen en el mapa de suelos elaborado por el Servicio de Estructuras Agrarias del Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación del Gobierno de Navarra.

Este parámetro se calculó en un trabajo anterior (Larrañaga, 2006) basándose en los resultados obtenidos de porosidad para los siete suelos iniciales de la cuenca



(Amezkua, 2002) tras superponerlos con el mapa de planos y canales de la cuenca (Tabla 3.3.1.7).

**Tabla 3.3.1.7.- Porosidad para cada plano en la cuenca de La Tejería**

Elemento	Media ponderada de <i>POR</i>
6	0,477
7	0,479
8	0,477
9	0,479
10	0,478
11	0,476
12	0,477
13	0,477
14	0,463
15	0,474
16	0,470
17	0,473
18	0,471

#### • Conductividad hidráulica en saturación

En el trabajo de Amezkua (2002), se obtuvieron los resultados de conductividad hidráulica (eq. 3.1) en saturación a partir de fórmulas empíricas que relacionan la textura y la porosidad con la conductividad (Morel-Seytoux, 1988, basado en Brakensiek, 1979).

$$K_s = e \left[ 19.52348 (\phi) - 8.96847 - 0.028212 (Ac) + 0.000018107 (Ar2) - 0.0094125 (Ac2) - 8.395215 (\phi2) + 0.077718 (Ar2) (\phi2) - 0.00298 (Ar2) (\phi2) - 0.019492 (Ac2) (\phi2) + 0.0000173 (Ar2) + 0.02733 (Ac2) (\phi) + 0.001434 (S2) (\phi) - 0.0000035 (Ac2) (Ar) \right] \quad (3.1)$$

donde:

$K_s$  : Conductividad hidráulica en saturación (cm/h)

$\phi$  : Porosidad (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)

$Ac$  : Porcentaje de arcilla (5-60%)

$Ar$  : Porcentaje de arena (5-70 %)

Después, en el trabajo de Larrañaga (2006), se calculó el valor de este parámetro para cada plano. En la Tabla 3.3.1.8 se muestran los resultados.

**Tabla 3.3.1.8.- Valores medios ponderados de la conductividad hidráulica ( $K_s$ ), para cada elemento.**

Elemento	Media ponderada de $K_s$
4	0,620
5	0,620
6	1,084
7	0,484
8	0,703
9	0,749
10	1,112
11	1,331
12	1,083
13	1,247
14	3,029
15	1,390
16	2,236
17	1,575
18	1,268

**3.3.1.2.3.- Parámetros de erosión de la cuenca**

EUROSEM, además de ser un modelo hidrológico de simulación de escorrentía, puede simular la erosión y exportación de sedimentos de una cuenca. Para ello, el modelo separa la erosión causada por la energía de las gotas de lluvia y la causada por el flujo de agua superficial. Por lo tanto, los parámetros de erosión se pueden dividir en:

- Parámetros de erosión por salpicadura
  - PLANTH
  - EROD
  - RECS
  - RFR
- Parámetros de erosión por escorrentía
  - COH
  - D50

A continuación se estudiará por separado los parámetros de erosión por salpicadura y los de erosión por escorrentía.

- **PLANTH**

Se corresponde con la altura efectiva de la planta e interviene en el cálculo de la energía efectiva de la gota de agua procedente del drenaje de las hojas (Brandt, 1990). Este valor está relacionado con la altura de la planta en el momento de ocurrencia del

evento, y los valores se pueden obtener por observación en campo. En nuestro caso, tomaremos valores entre 0 y 5 cm para la mayoría de eventos ya que nos movemos en fechas de noviembre a febrero. Para eventos más tardíos se cogerá un valor entre 5-15 cm.

- **EROD**

Hace referencia a los gramos de material que se arrancan por cada Julio de energía de la gota de lluvia. Dicho valor se encuentra tabulado (Tabla A.2.3 en Anexos) dependiendo de la textura del suelo. Se optará por un valor de 1,7 g/J ya que los suelos son predominantemente de textura franco arcillosa.

- **RFR**

El parámetro *RFR* (*Surface Roughness Ratio*), expresa la rugosidad de la superficie del suelo, medida en la dirección pendiente abajo (en la dirección del flujo de agua). Se hizo una aproximación a toda la cuenca, calculando la *RFR* (*Infiltration Recession Factor*) de 6 perfiles de rastra lisa en dirección pendiente abajo y aplicándolo como valor para toda la cuenca (Larrañaga, 2006). En la Tabla 3.3.1.9 se resumen los valores obtenidos.

**Tabla 3.3.1.9.- Resumen de los valores de RFR obtenidos para cada perfil** (Larrañaga, 2006)

	Perfil_1	Perfil_2	Perfil_3	Perfil_4	Perfil_5	Perfil_6
Y (mm)	7375,08	6826,47	7237,04	8055,90	7452,98	7928,81
X (mm)	5000	5000	5000	5000	5000	5000
RFR	32,2	26,76	30,91	37,93	32,91	36,94
<b>RFR medio</b>	<b>32,94</b>					

- **RECS**

Este parámetro describe la rugosidad del terreno y representa el valor medio de la altura de la lámina de agua cuando la superficie está completamente cubierta de agua. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.3.1.10.

**Tabla 3.3.1.10.** -Resumen de los valores de RECS obtenidos para cada perfil (Larrañaga, 2006)

	Perfil_1	Perfil_2	Perfil_3	Perfil_4	Perfil_5	Perfil_6
Máx altura	49,4	57,22	46,58	37,52	53,70	66,96
Mín altura	-90,0	-56,58	-52,85	-88,25	-70,21	-83,43
Diferencia	139,40	113,80	99,43	125,77	123,91	150,39
<b>RECS medio</b>	<b>125,45</b>					

- **COH**

Es el valor de la cohesión del suelo en saturación medido en kPa. Este valor existe tabulado (Vickers, 1993) donde el valor final será la suma de cohesión del suelo dependiendo de la textura junto a un incremento según el tipo de cultivo (Tabla A.2.4 y Tabla A.2.5 en Anexos). Se ha tomado un valor de 10,4 kPa, ya que tenemos un suelo franco arcilloso con una compactación media obteniendo, así un valor de 10 kPa; más un aumento debido al tipo de cultivo (cereal) de 0,4 kPa.

- **D<sub>50</sub>**

Indica el tamaño medio de las partículas del suelo que son transportadas. Amezkua (2002), calculó este parámetro para las diferentes unidades de suelo de la cuenca de Latxaga. Lo halló mediante el método USDA, interpolando en la curva granulométrica el porcentaje de los agregados del sedimento que tienen los diferentes tamaños: arena, arcilla y limo. Después, en el trabajo de Larrañaga (2006) se calculó este valor para cada plano (Tabla 3.3.1.11):

**Tabla 3.3.1.11.-** Valores de D50 (μm) obtenidos para cada plano en la cuenca de La Tejería

Planos	D <sub>50</sub> (μm)
6	74
7	72
8	74
9	78
10	86
11	78
12	75
13	79
14	91
15	88
16	91
17	84
18	81

#### 3.3.1.2.4.- Parámetros relacionados con la vegetación

La vegetación es un factor que influye de forma determinante en los procesos hidrológicos por lo que en el modelo EUROSEM se le dedica un peso importante. Estos son los parámetros que influyen:

- COVER
- DINTR
- PLANGE
- SHAPE
- PBASE

Dichos parámetros hacen referencia al tipo de cultivo así como a la época del año en la que nos encontremos. En nuestro caso, la cuenca es mayoritariamente cerealista y nos moveremos en épocas comprendidas entre noviembre y febrero en su mayoría.

- **COVER**

Hace referencia a la superficie de suelo cubierta por la vegetación. Este coeficiente varía estacionalmente según va creciendo el cultivo. En la Tabla A.2.6 (Anexos) se representan los valores para diferentes cultivos y épocas del año (De Roo, 1995). En los eventos que nos movemos será 0 para la mayoría de ellos y 0,25 para el evento que se tiene a finales de abril.

- **DINTR**

Este parámetro nos da información sobre la máxima capacidad de interceptación de la cubierta vegetal. Depende principalmente del tipo de cultivo y de la época del año en la que nos encontramos. Este parámetro se encuentra definido en la Tabla A.2.7 (Anexo) (Morgan *et al.*, 1998). En nuestro caso será de 3 mm para el evento de abril y 0 para el resto ya que no habrá cubierta vegetal.

- **PLANGE**

Este parámetro indica el ángulo medio formado por el tallo de las plantas con el suelo. Dicho valor se encuentra en la tabla A.2.8 (Anexo). Se optará por el valor 85 grados.

- **SHAPE**

Este parámetro describe la forma del cultivo clasificándola en cultivos de hoja estrecha al que se le asignará un valor de 1 y cultivos de hoja ancha al que se les asigna el valor 2. En este caso se seleccionará el valor 1. Se resume en la Tabla A.3.8 (Anexo).

- **PBASE**

Se trata de la superficie de suelo ocupada por los tallos de la planta expresada en en una escala entre 0 y 1. En la Tabla A.3.9. (Anexo) (Holtan, 1961) se muestran los valores de PBASE dependiendo del la cobertura vegetal y la condición de dicha cobertura. Será prácticamente nula en los eventos invernales, y tomará un valor de 0,25 en el evento de abril.

**3.3.1.3.- Calibración del modelo (según Larrañaga, 2006)**

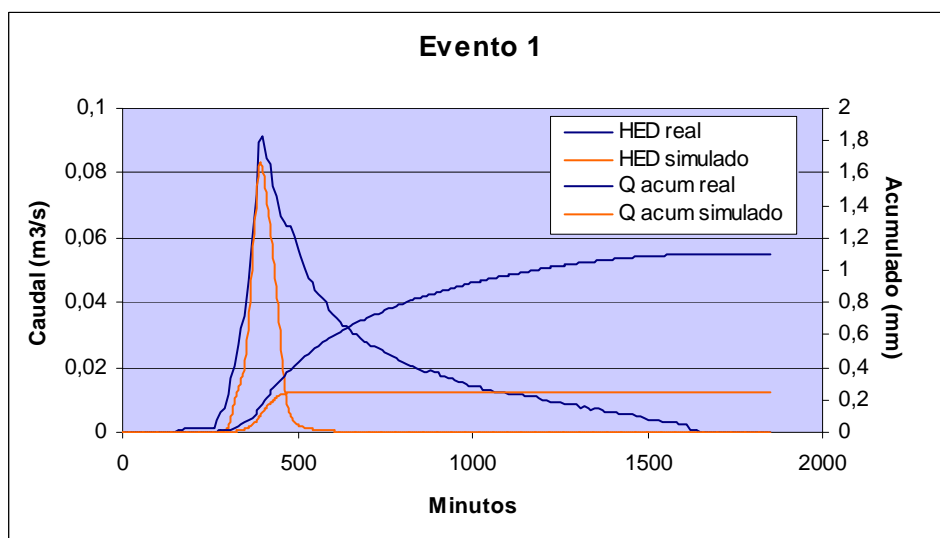
La calibración consiste en variar los valores de los parámetros más sensibles que componen el modelo para ajustar lo simulado a lo real.

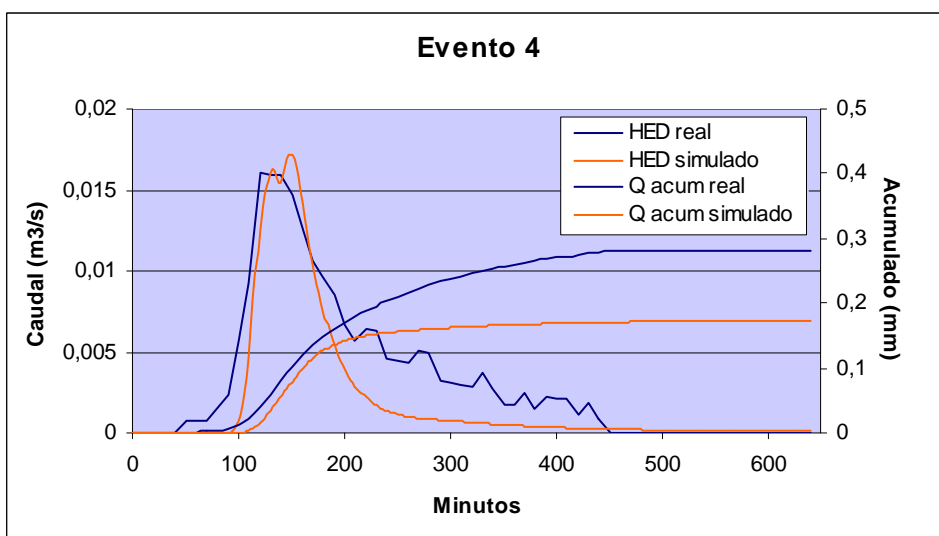
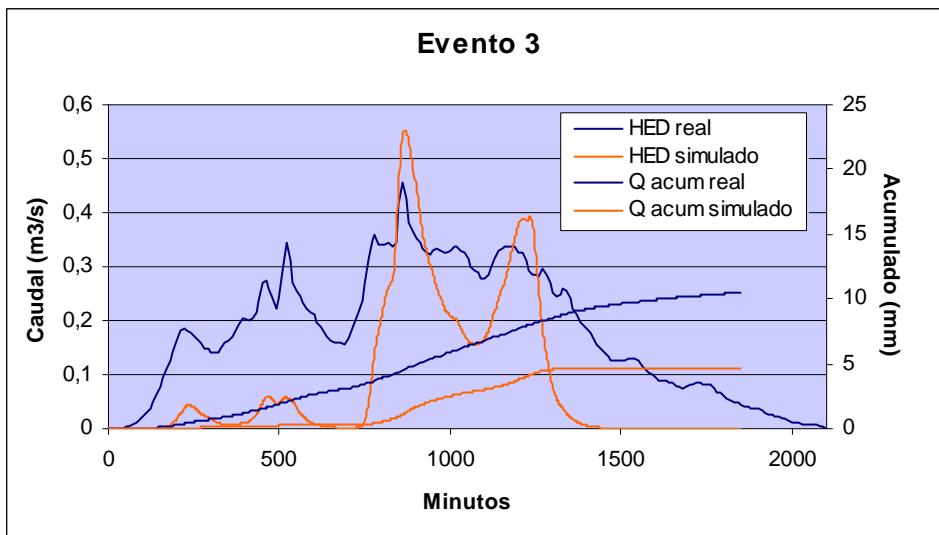
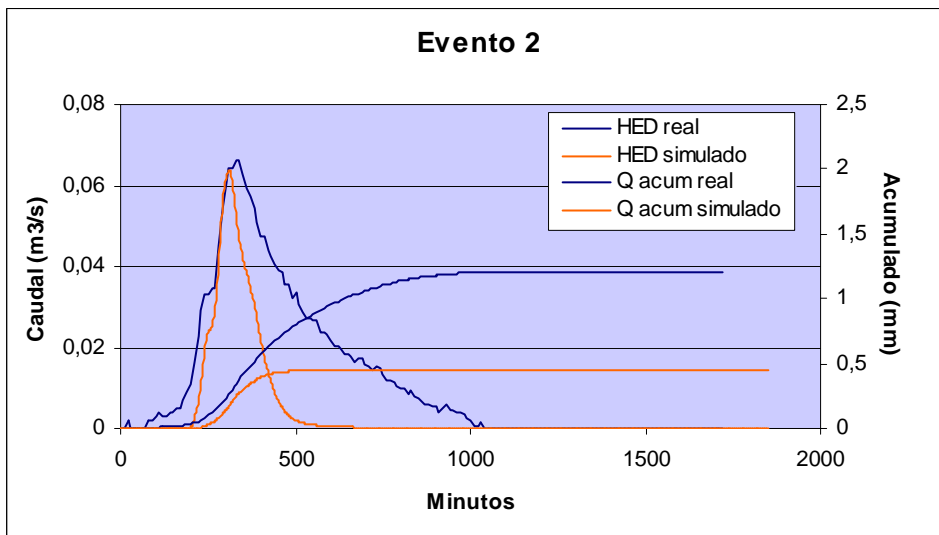
Las variables seleccionadas para la calibración serán el caudal punta en el caso de los hidrogramas de escorrentía directa y el caudal punta de sedimentos en el caso de los sedimentogramas (Tabla 3.3.1.12).

**Tabla 3.3.1.12.- Caudales punta de caudal y sedimento para cada evento**

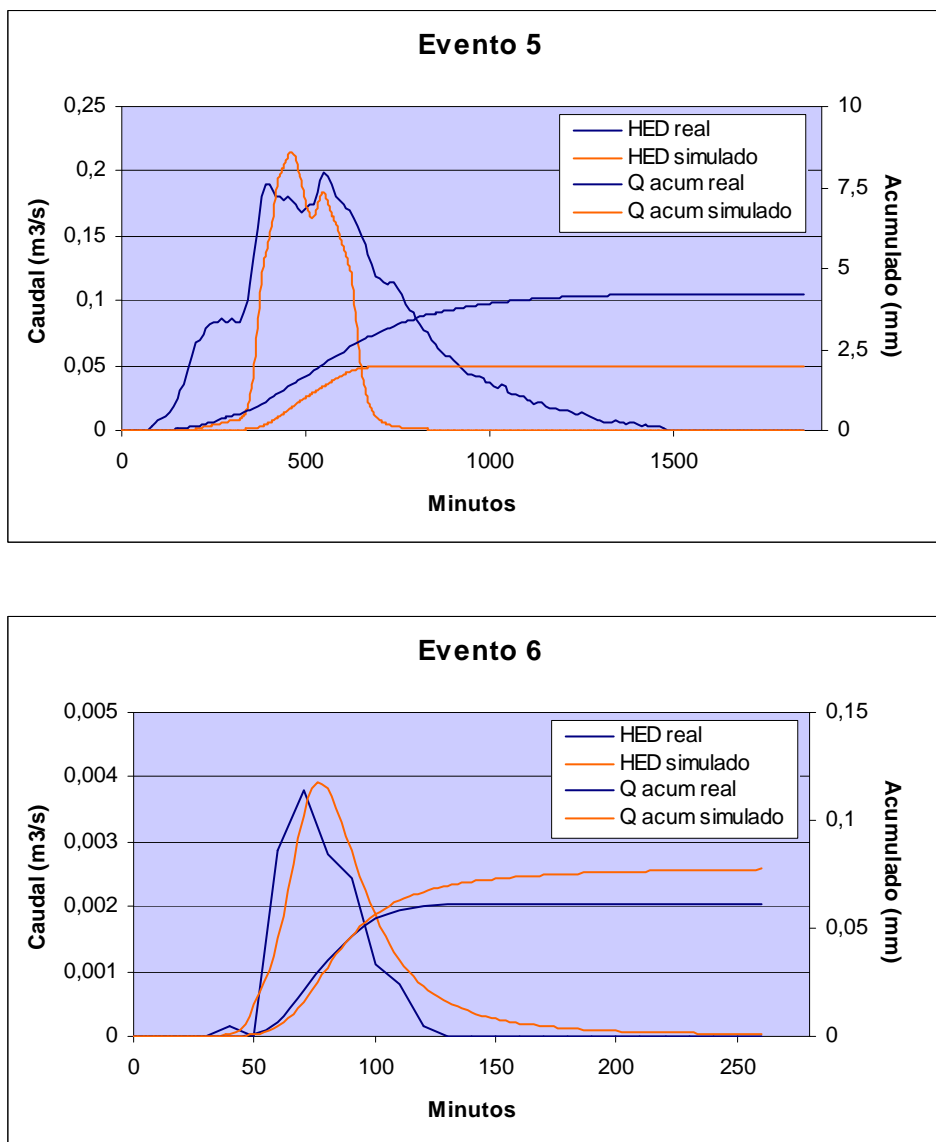
Evento	Fecha evento	Caudal punta ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Valor punta de sedimentos ( $\text{kg}/\text{min}$ )
1	23/12/2009	0,091	107,6
2	28/12/2009	0,066	62,67
3	13/01/2010	0,44	-
4	04/02/2010	0,016	8,50
5	17/02/2009	0,199	187,7
6	29/04/2010	0,0038	0,29

Para la calibración de la escorrentía se modificará el parámetro FMIN (conductividad hidráulica en saturación) ya que es la variable mas sensible para este fin (Díez, 2007). Los valores obtenidos tendrán que ajustarse al hidrograma real de escorrentía directa calculado en el apartado 3.2.1. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la calibración (Fig. 3.3.1.6).









**Fig.- 3.3.1.6.- Hidrogramas reales y simulados**

En la siguiente Tabla 3.3.1.13 se muestra el porcentaje en que se ha tenido que modificar la conductividad hidráulica en saturación para un óptimo ajuste.

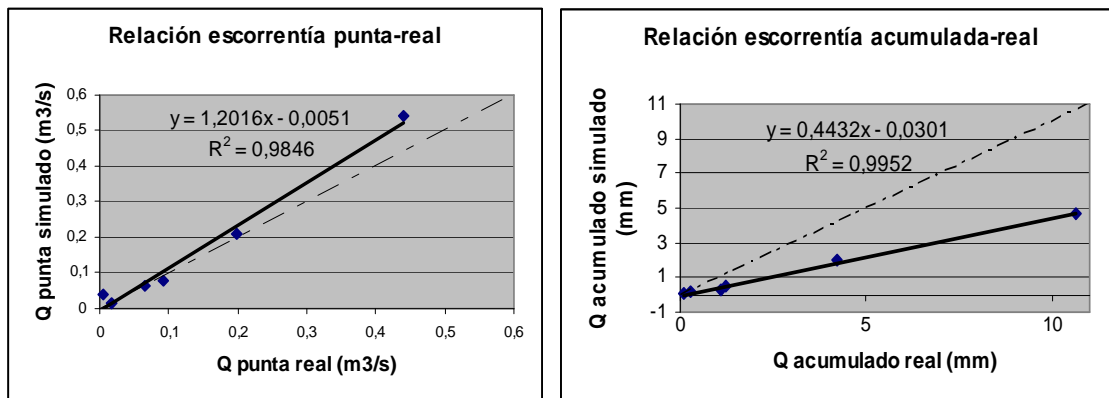
**Tabla 3.3.1.13.- Porcentaje de variación de la FMIN a los fines de una correcta calibración de los resultados.**

Evento	$\Delta$ FMIN (%)
1	0%
2	-35%
3	-60%
4	-35%
5	-40%
6	-30%
<b>Promedio</b>	<b>-33%</b>

Nos vimos en la necesidad de reducir el parámetro *RFR* (rugosidad de la superficie del terreno medida pendiente abajo) ya que varios eventos seleccionados eran de caudales bajos y el agua quedaba retenida en los distintos planos que conforman la cuenca de manera que no se producía escorrentía. Así, se redujo un 25% para todos los eventos; aun así estos valores se encuentran dentro del rango de variación experimental mostrados en el trabajo original de Larrañaga (2007). A fines comparativos, en las calibraciones de los datos experimentales se realizó idéntica reducción (esto es, 25%).

Para la calibración de todos los eventos se ha tenido que reducir el valor de la conductividad hidráulica en saturación. En más de la mitad de los eventos analizados se ha tenido que reducir en porcentajes comprendidos entre el 30 y 40%, aunque existe un evento en el que no ha hecho falta calibrarlo y otro en el que se ha tenido que reducir un 60%. Así, obtenemos una media de -33%.

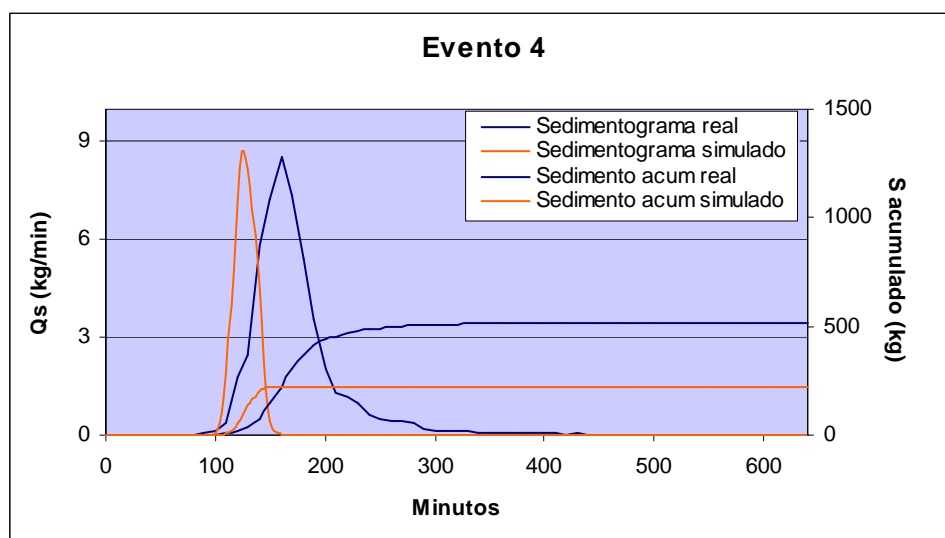
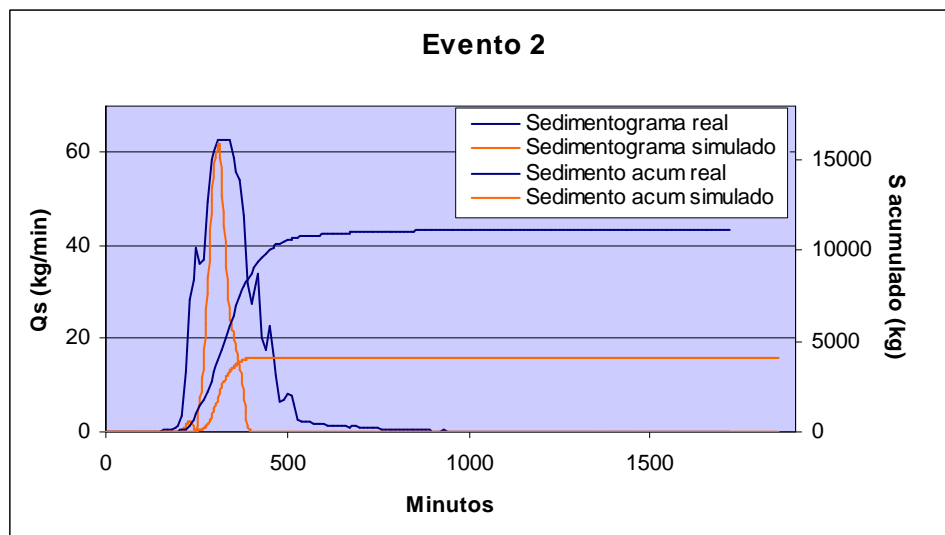
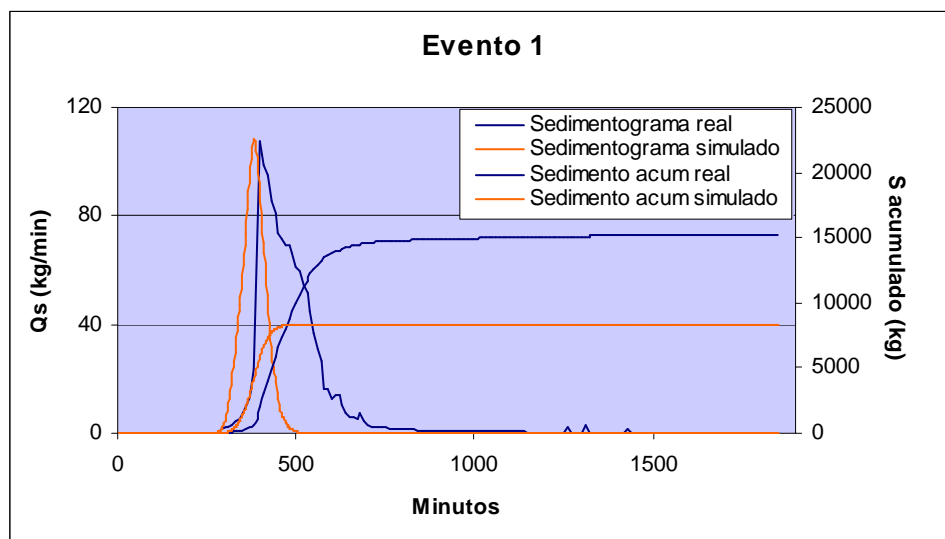
A continuación se realizan los gráficos donde se comparan el caudal punta real con el simulado, como también la cantidad de volumen acumulado real con el simulado (Fig. 3.3.1.7).

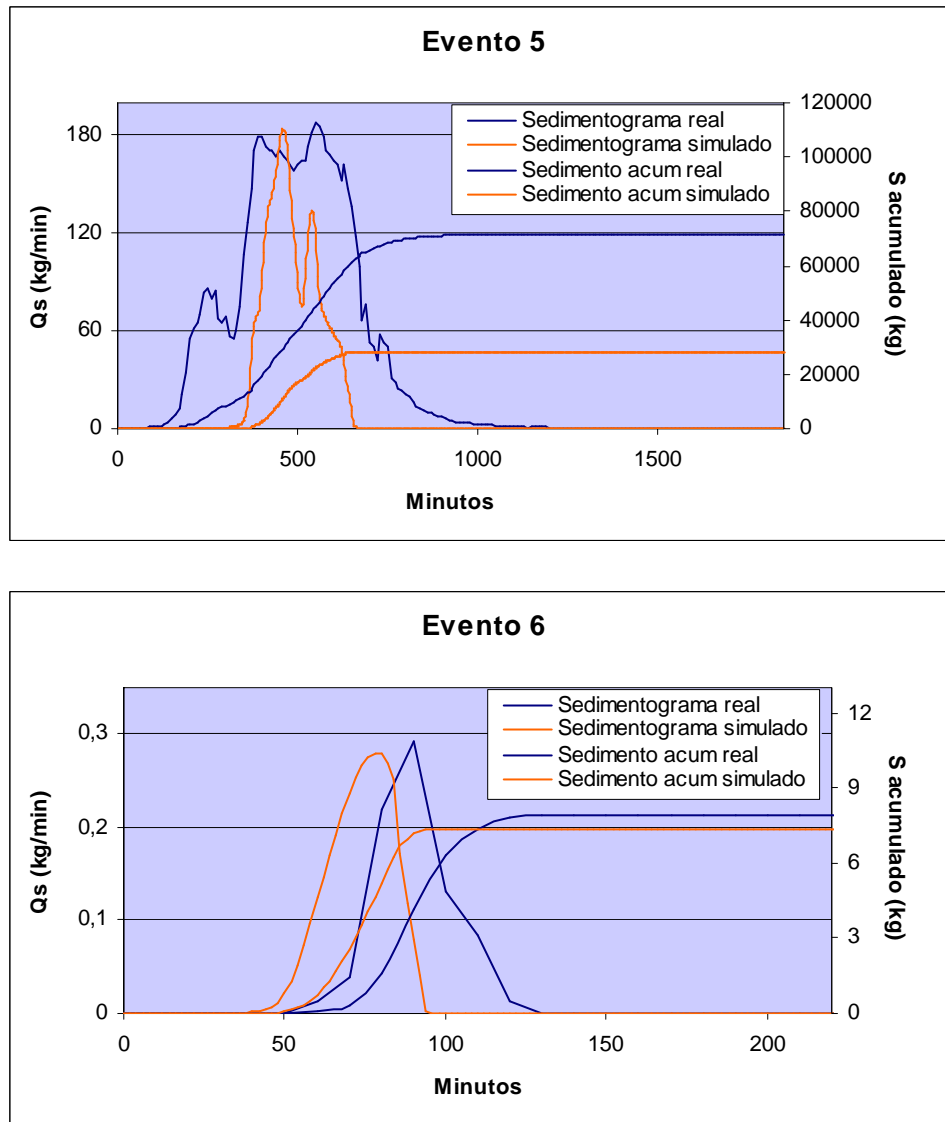


**Fig. 3.3.1.7.-** Comparación del *Q* punta real con el simulado y el *Q* acumulado real con el simulado

La relación existente entre el caudal punta real y el simulado es muy buena ya que posee un coeficiente de regresión de 0,9846. Además la pendiente de la recta se ajusta razonablemente bien a la bisectriz, que sería la recta de perfecto ajuste. Por lo tanto, podemos decir que el modelo simula con aceptable fidelidad los caudales punta. No obstante, el caudal acumulado real posee un coeficiente de regresión cercano a 1, pero la pendiente de la recta se ajusta mal a la bisectriz. En todos los eventos analizados el caudal acumulado simulado es menor al real, por lo que podemos afirmar que EUROSEM subestima este aspecto.

A continuación (Fig. 3.3.1.8) se mostrarán los resultados obtenidos en la calibración del sedimentograma.





**Fig. 3.3.1.8.- Sedimentogramas reales y simulados**

Para realizar las calibraciones, se intentó modificar el parámetro  $D_{50}$  (tamaño de partícula), e intentar no modificar el COH (cohesión del suelo en saturación) para poderlo comparar con las simulaciones realizadas con los datos experimentales. En la Tabla 3.3.1.14 se resumen las modificaciones realizadas.

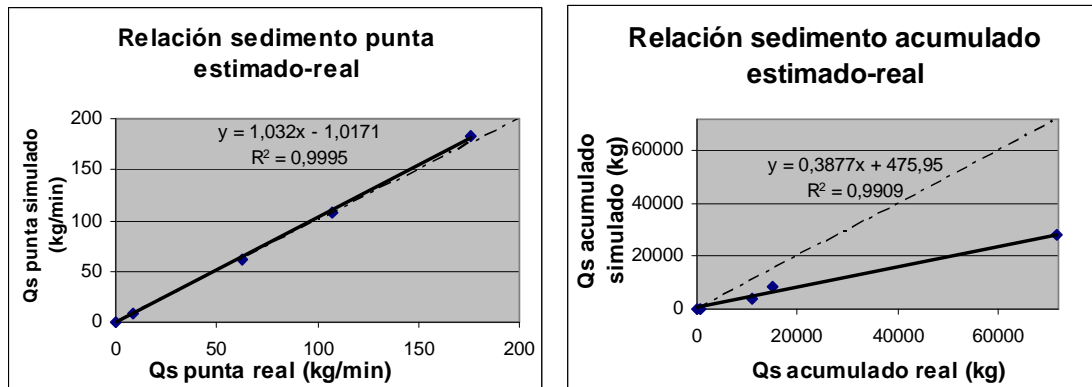
**Tabla 3.3.1.14.- Porcentaje que se han reducido COH Y  $D_{50}$**

Evento	$\Delta$ COH (%)	$\Delta$ $D_{50}$ (%)
1	-20%	-80%
2	0%	-57%
3	-	-
4	-50%	-80%
5	-25%	-80%
6	0%	-5%
<b>Promedio</b>	<b>-20%</b>	<b>-60%</b>

Se observa que tan solo dos de los cinco eventos se han podido calibrar reduciendo el tamaño de partícula ( $D_{50}$ ), en los demás a parte de reducir el tamaño de partícula un mínimo razonable ( $20\ \mu\text{m}$ ) se ha tenido que reducir el valor de cohesión para obtener una buena calibración. Así, como media obtenemos que se ha reducido el tamaño de partícula un 60%.

En definitiva, podemos afirmar que el EUROSEM simula con mayor fidelidad los hidrogramas que los sedimentogramas ya que las variaciones de los parámetros son menores. Aunque no se puede olvidar que los datos de sedimentos se han calculado a partir de regresión lineal con el error que ello conlleva.

A continuación se presenta las relaciones existentes entre caudal de sedimento punta estimado frente al real; así como, sedimento acumulado estimado y real (Fig. 3.3.1.19.)



**Fig. 3.3.1.19.-** Comparación de los datos reales de sedimentos con los simulados en cuanto a caudal punta y sedimento acumulado

El caudal punta de sedimentos simulado por el modelo se asemeja en gran medida a la realidad. El coeficiente de regresión que obtenemos es de  $R^2=0,9846$  y la pendiente de la recta se ajusta muy bien a la bisectriz. Así, podemos concluir que la simulación de caudales de sedimentos es aceptable.

Por otro lado, el modelo no simula igualmente bien el sedimento acumulado. Aunque tenemos una  $R^2=0,9952$ , la pendiente de la recta se aleja mucho de la bisectriz (ajuste perfecto). Además, el sedimento acumulado real es siempre superior al simulado.

**3.3.1.4.- Evaluación de variables medidas de campo**

Hasta ahora se ha realizado la calibración de los eventos basándose en los valores de entrada determinados en Larrañaga (2006). En este apartado se analizarán los distintos parámetros que se han medido en campo, para después alimentar el modelo con dichos valores y ver la respuesta del mismo.

- Parámetros hidráulicos de la cuenca:
  - *Conductividad hidráulica en saturación (FMIN)*
  - *Humedad inicial (THI)*
  - *Humedad máxima (THMAX)*
  - *Porosidad (POR)*
- Parámetros erosivos de la cuenca:
  - *Cohesión del suelo saturado (COH)*
  - *Energía de la gota de lluvia (EROD)*

A continuación se muestra el porcentaje que ocupan los suelos predominantes de la cuenca divididos por planos (Tabla 3.3.1.15). Así, se podrá realizar una media ponderada del parámetro medido en función del porcentaje de suelo que ocupa en cada plano obteniendo un único valor por plano. El Suelo 0 hace referencia a afloramientos rocosos.

**Tabla 3.3.1.15.- Porcentaje correspondiente a cada suelo predominante en La Tejería**

Plano	Suelo 0 (%)	Suelo T1 (%)	Suelo T2 (%)
6	14,00	1,30	84,70
7	8,46	7,58	83,96
8	15,00	8,08	76,92
9	3,42	23,80	72,78
10	3,26	59,59	37,15
11	17,20	3,68	79,12
12	14,75	18,17	67,08
13	13,54	26,81	59,65
14	14,22	67,02	18,76
15	0,04	71,81	28,15
16	55,17	31,51	13,32
17	11,71	23,61	64,68
18	3,20	3,75	93,05

○ *Conductividad hidráulica en saturación (FMIN)*

Para el cálculo de la conductividad hidráulica en saturación recurriremos a las curvas de infiltración de cada suelo. Llega un momento en que la infiltración se mantiene más o menos constante (Tabla 3.3.1.16), momento en el cual toma valores próximos a la conductividad hidráulica en saturación.

**Tabla 3.3.1.16.-** Tasa de *infiltración final en los diferentes suelos.*

	Suelo T1 (mm/h)	Suelo T2 (mm/h)
Repetición 1	22,5	26,6
Repetición 2	35,6	27,1
Repetición 3	19,4	25,7
<b>Media</b>	<b>25,8</b>	<b>26,5</b>

Los valores para cada plano se muestran en la Tabla 3.3.1.22 tras realizar una media ponderada con el valor del parámetro y el porcentaje de cada suelo predominante.

○ *Humedad inicial (THI)*

La humedad antecedente del suelo interfiere en la respuesta hidrológica de las cuencas (Rabadà *et al.*, 1994), en especial en producción de escorrentía; y por ende en los procesos erosivos. De hecho, diversos trabajos han demostrado que, a escala de cuenca, la generación de escorrentía no estaba relacionada con la intensidad de precipitación; sino con las condiciones antecedentes de humedad (Llorens y Gallart, 1992; Latron, 2003; Lana-Renault *et al.*, 2007). Así, de los eventos estudiados, se posee el valor de la humedad inicial para cada suelo predominante (Tabla 3.3.1.17). Los valores de THI obtenidos por cada plano para los distintos eventos se muestran en la Tabla 3.3.1.18.

**Tabla 3.3.1.17.-** *Humedad inicial para cada suelo.*

Evento	Fecha evento	Fecha medición de humedad	Humedad suelo T1 (%)	Humedad suelo T2 (%)
1	23/12/2009	22/12/2009	39,88	37,19
2	28/12/2009	22/12/2009	39,88	37,19
3	13/01/2010	29/12/2009	43,55	42,78
4	04/02/2010	02/02/2010	38,58	37,15
5	17/02/2009	17/02/2010	50,22	47,43
6	29/04/2010	27/04/2010	31,00	28,45

**Tabla 3.3.1.18.- THI para cada plano por evento**

Plano	Evento 1 (%)	Evento 2 (%)	Evento 3 (%)	Evento 4 (%)	Evento 5 y THMAX (%)	Evento 6 (%)
6	37,2	37,2	41,0	37,2	47,5	28,5
7	37,4	37,4	41,0	37,3	47,7	28,7
8	37,4	37,4	41,1	37,3	47,7	28,7
9	37,9	37,9	41,2	37,5	48,1	29,1
10	38,8	38,8	41,7	38,0	49,1	30,0
11	37,3	37,3	41,0	37,2	47,6	28,6
12	37,8	37,8	41,2	37,5	48,0	29,0
13	38,0	38,0	41,3	37,6	48,3	29,2
14	39,3	39,3	41,9	38,3	49,6	30,4
15	39,1	39,1	41,8	38,2	49,4	30,3
16	39,1	39,1	41,8	38,2	49,4	30,2
17	37,9	37,9	41,3	37,5	48,2	29,1
18	37,3	37,3	41,0	37,2	47,5	28,6

○ *Humedad máxima (THMAX)*

Como podemos observar en la figura 3.1.2.12 la humedad máxima se alcanza el 17 de febrero y tras una observación a campo ese día se determina que el suelo se encuentra saturado, por lo que este será nuestro valor de THMAX que coincide con el evento 5 (Tabla 3.3.1.18).

○ *Porosidad (POR)*

Los datos de porosidad usados se determinaron aplicando la eq. 2.1.9. en función de la densidad aparente media obtenida experimentalmente en ambos suelos. (Tabla 3.3.1.19):

**Tabla 3.3.1.19.- Densidades aparentes y porosidades para cada suelo**

Tipo suelo	Da (g/cm3)	Porosidad (%)
T2	1,416	0,466
T2	1,659	0,374
T2	1,106	0,583
T2	1,399	0,472
T2	1,265	0,523
T2	1,085	0,591
T1	1,322	0,501
T1	0,947	0,643
T1	1,114	0,580



Realizando una media del valor obtenido para cada suelo, los valores se resumen en la Tabla 3.3.1.22.

○ *Cohesión del suelo saturado (COH)*

Estos fueron los resultados medidos en campo mediante el Torvane con el suelo saturado (Tabla 3.3.1.20):

**Tabla 3.3.1.20.-** Valores de *cohesión de los suelos, en kPa*

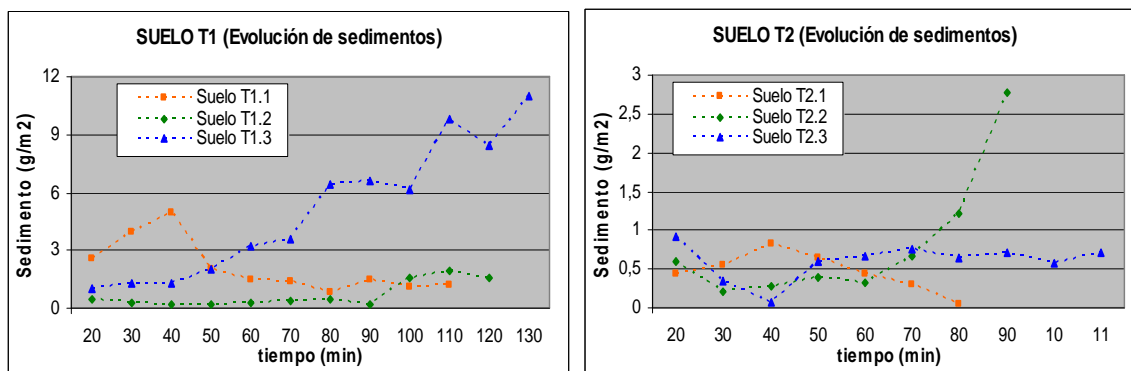
Repeticiones	Suelo T1 (kPa)	Suelo T2 (kPa)
1	39,2	29,4
2	53,9	34,3
3	63,7	49,0
4	68,6	34,3
5	34,3	44,1
6	49,0	49,0
7	44,1	19,6
8	34,3	29,4
9	44,1	34,3
10	44,1	34,3
11	44,1	32,3
12	61,7	19,6
13	63,7	24,5
14	68,6	34,3
15	70,6	34,3
<b>Media</b>	<b>52,3</b>	<b>33,5</b>

Los resultados por cada plano se encuentran resumidos en la Tabla 3.3.1.22.

○ *Energía de la gota de lluvia (EROD)*

Para obtener la energía cinética de la lluvia se empleó la *eq. 2.18* (Cooper, 2007). Para la obtención de esta fórmula Cooper usó un simulador similar al nuestro con la misma altura e intensidad de lluvia.

Obtenemos un valor de KE de  $6,17 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^2$ . Para obtener los g/J para poder introducirlo en el modelo se tendrá que dividir los  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  erosionados por el valor anterior obteniendo así el valor deseado. El valor del sedimento erosionado por metro cuadrado lo podemos estimar a partir de las curvas de evolución de la erosión (Fig. 3.3.1.20.) Se optará por el valor que tenga la curva cuando ésta se haga constante.



**Fig. 3.3.1.20.- Evolución de los sedimentos en g/m2 para cada suelo**

Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 3.3.1.21.

**Tabla 3.3.1.21.- Sedimento generado por unidad de energía cinética**

	Suelo 1 (g/J.mm <sup>-1</sup> )	Suelo2 (g/J.mm <sup>-1</sup> )
Repetición 1	0,203	0,042
Repetición 2	0,275	-
Repetición 3	-	0,107
<b>Promedio</b>	<b>0,238</b>	<b>0,074</b>

En dos de las repeticiones estudiadas, la curva no se hacia constante, por lo que se han omitido estos datos. Los valores para cada plano en g.J<sup>-1</sup> se muestran en la Tabla 3.3.1.22.

**Tabla 3.3.1.22.- FMIN, POR , COH y EROD para cada plano de La Tejería.**

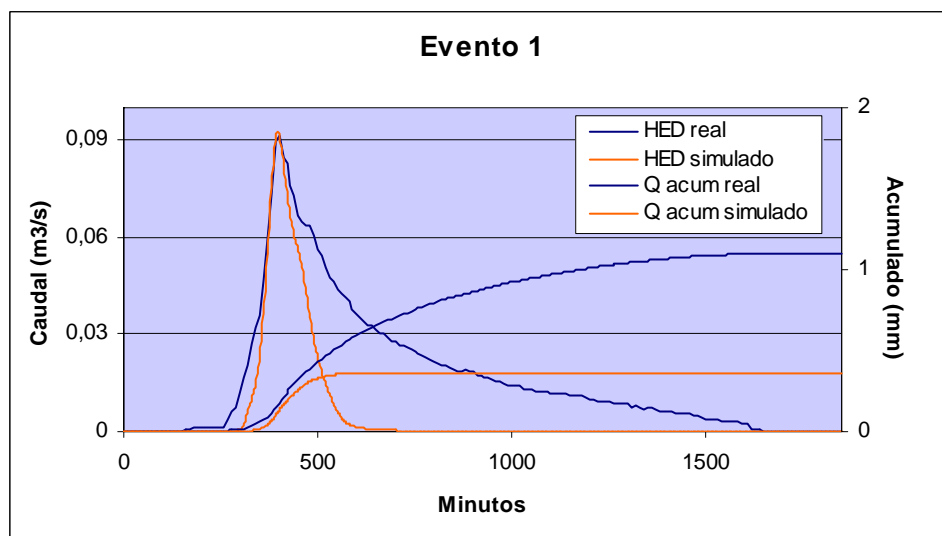
Plano	FMIN (mm/h)	P (%)	COH (kPa)	EROD (g/J)
6	22,8	0,493	29,1	1,67
7	24,2	0,520	32,1	2,03
8	22,5	0,482	30,0	1,93
9	25,4	0,537	36,8	2,79
10	25,2	0,512	43,6	4,27
11	21,9	0,473	28,4	1,70
12	22,5	0,476	32,0	2,35
13	22,7	0,477	34,0	2,73
14	22,3	0,443	41,3	4,37
15	26,0	0,521	47,0	4,84
16	11,7	0,234	20,9	2,14
17	23,2	0,490	34,0	2,63
18	25,6	0,553	33,1	1,97

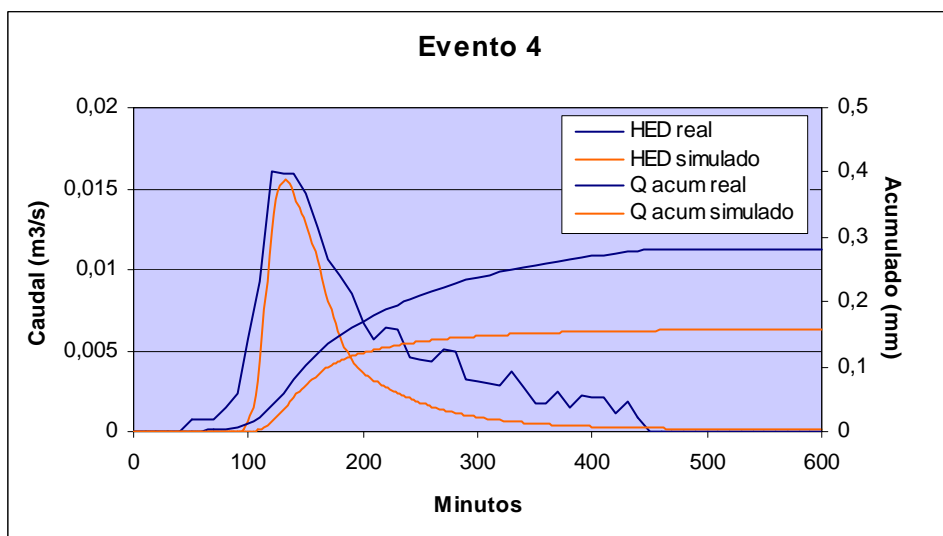
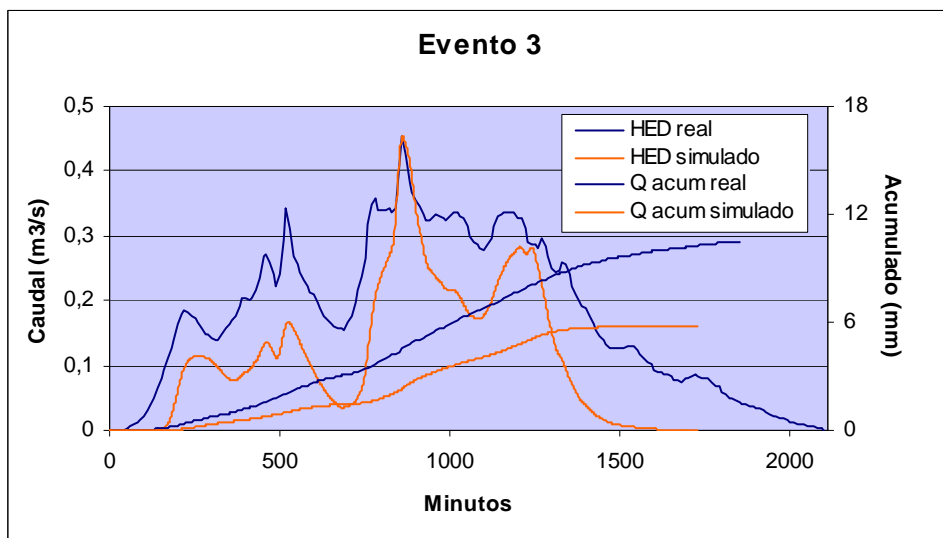
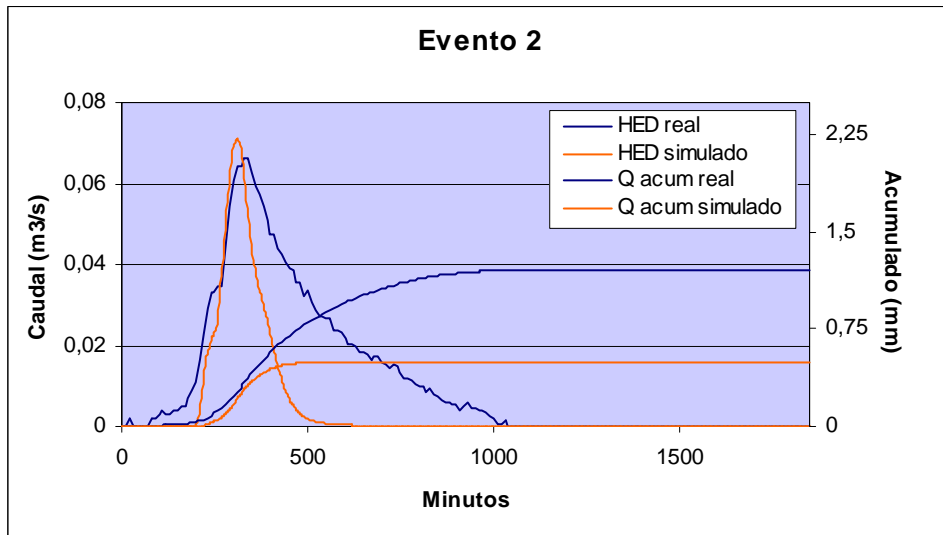
### 3.3.1.5.-Calibración del modelo incorporando datos experimentales

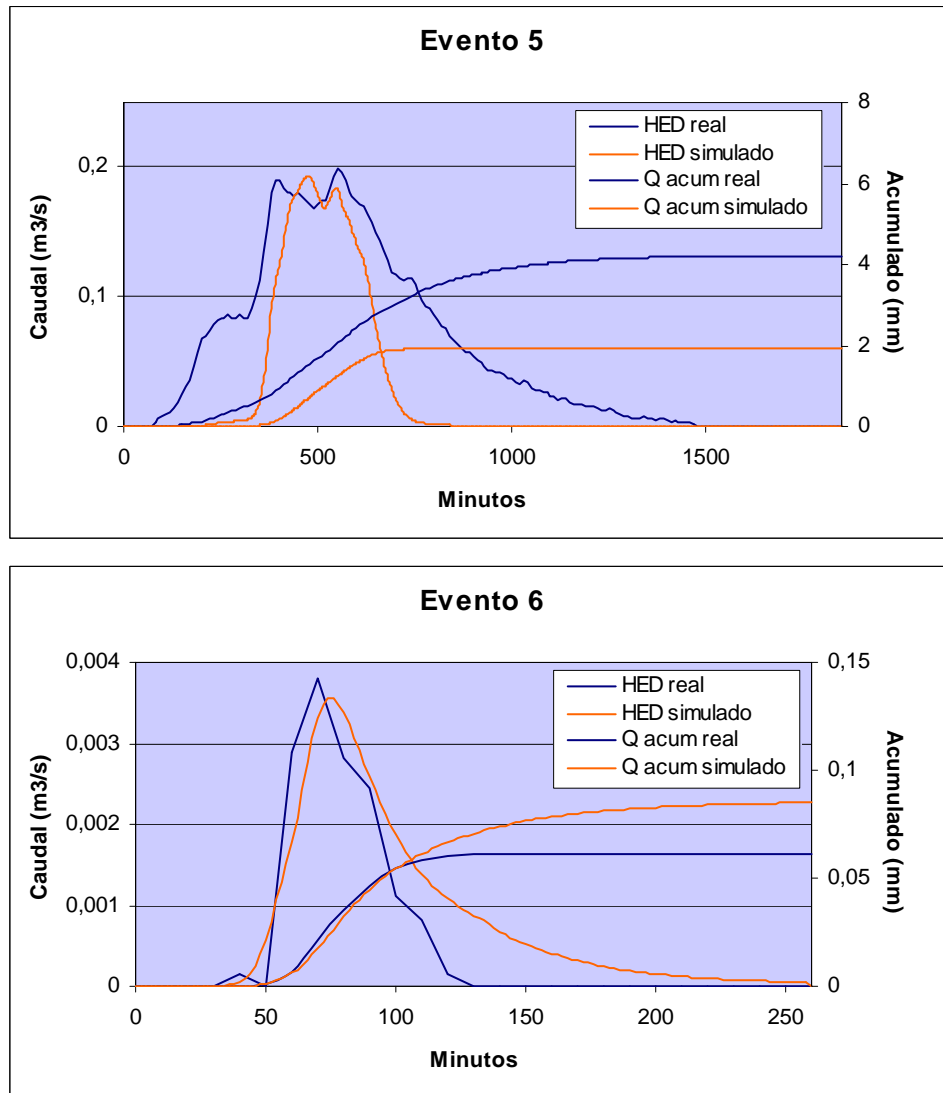
Tras introducir los nuevos datos en el modelo se siguieron distintos pasos para realizar la calibración del hidrograma; para ello se trató de no modificar los parámetros estimados a campo.

- 1.- Corriendo el modelo sin modificar ninguno de los valores, se observaba que todo lo que llovía se infiltraba en los distintos planos que forman la cuenca; así que no se generaba escorrentía y, por tanto, tampoco hidrograma alguno.
- 2.- Se optó por reducir la porosidad del terreno dentro del rango medido en campo; esto es, se asignó a cada uno de los planos la porosidad más baja calculada a partir de las densidades aparentes recabadas a campo. Aún así, el modelo seguía sin generar escorrentía.
- 3.- De esta forma se optó por reducir la conductividad hidráulica en saturación (*FMIN*) ya que fue la única forma posible de generar escorrentía.
- 4.- Por último, se redujo la rugosidad del terreno (*RFR*) dentro del rango de variación de los propios datos experimentales de Larrañaga (2006), con el fin último de no variar tanto los valores de conductividad hidráulica. Además, en algunos eventos de caudales muy bajos el agua de escorrentía se quedaba atrapada en las depresiones del terreno y no llegaba a la salida de la cuenca.

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig 3.3.1.21.







**Fig. 3.3.21.-** Calibración de hidrogramas de escorrentía directa incorporando datos experimentales

En la Tabla 3.3.1.23 se muestra la reducción porcentual de los valores de conductividad hidráulica en saturación en la calibración:

**Tabla 3.3.1.23.-** Calibración de EUROSEM para los eventos seleccionados: Variación porcentual del parámetro FMIN.

Evento	$\Delta$ FMIN (%)
1	-95%
2	-97%
3	-80%
4	-97%
5	-95%
6	-95%
<b>Promedio</b>	<b>-93%</b>

En todos los eventos estudiados, sobre todo en aquellos de pequeño caudal, se ha tenido que reducir un porcentaje muy elevado el parámetro FMIN (Tabla 3.3.1.23).

A continuación se realizará una comparación del caudal punta real con el estimado, así como del caudal acumulado real y el estimado (Fig. 3.3.1.22).

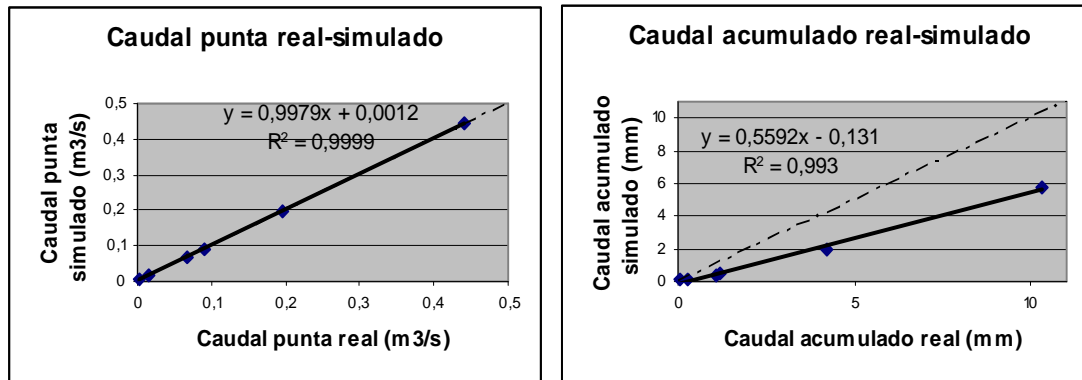
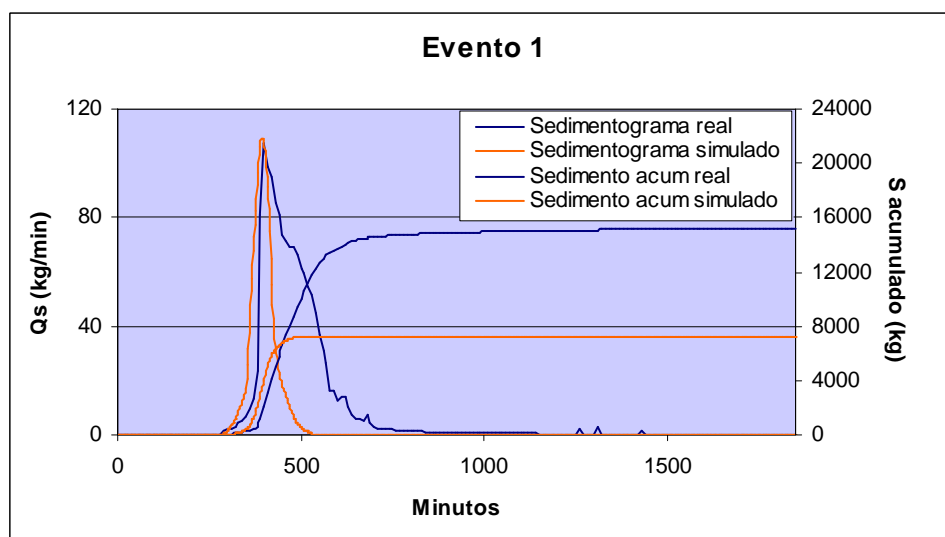
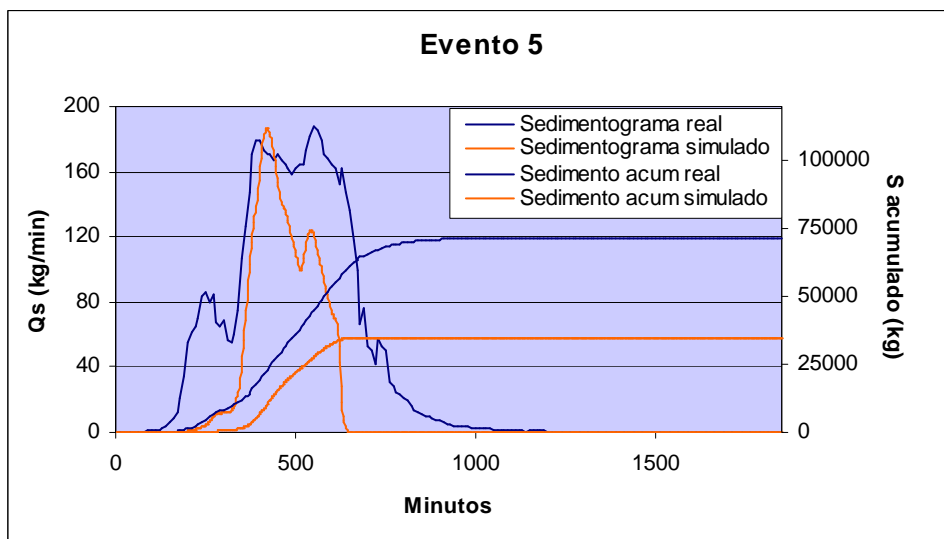
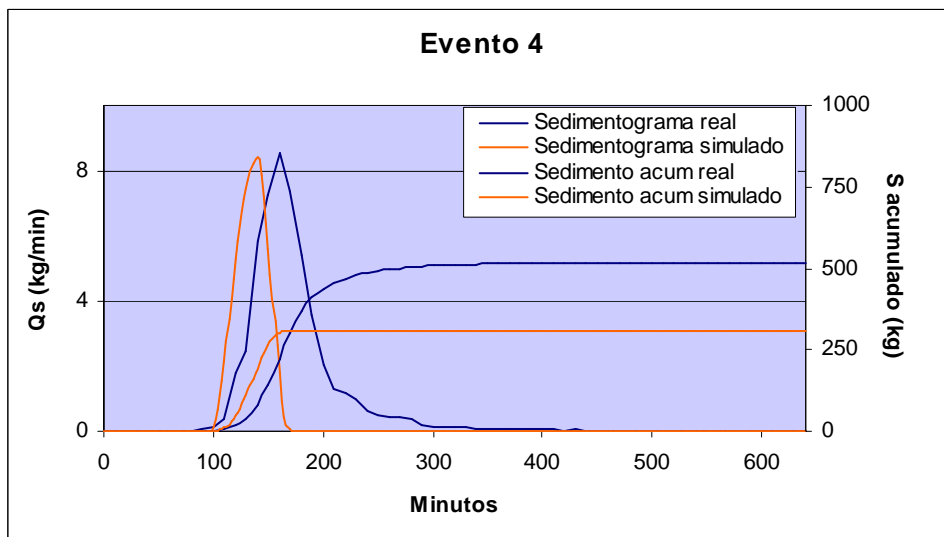
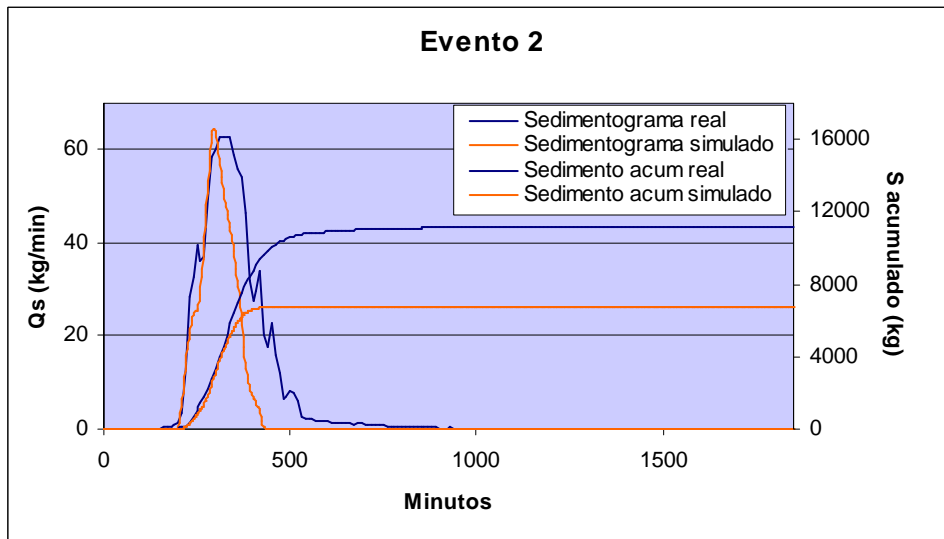


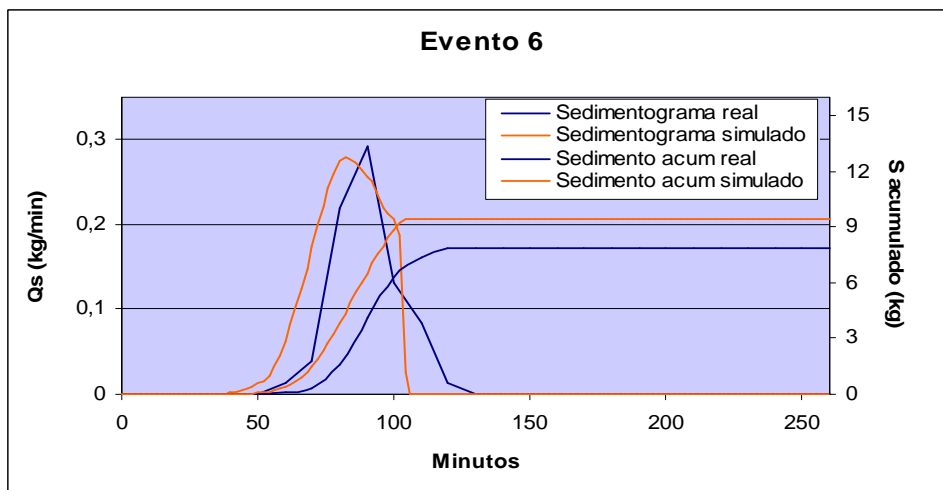
Fig. 3.3.1.22.- Comparación del caudal punta real y del volumen acumulado con el simulado

Como ha venido sucediendo hasta ahora el caudal punta se ajusta mejor a la recta bisectriz en cuanto a la pendiente y tiene un coeficiente de regresión del 0,9999. En cambio, en el caso del caudal acumulado el ajuste es menos satisfactorio (Fig. 3.3.1.22) aunque con un  $R^2$  igualmente elevado ( $R^2=0,993$ ).

Por su parte, para la calibración de los sedimentogramas se emplearon los archivos con los que se calibró el hidrograma y se fue modificando el parámetro  $D_{50}$ , ya que el COH se midió en campo y corresponde a un valor experimental. Estos fueron los resultados que se obtuvieron (Fig. 3.3.1.23).







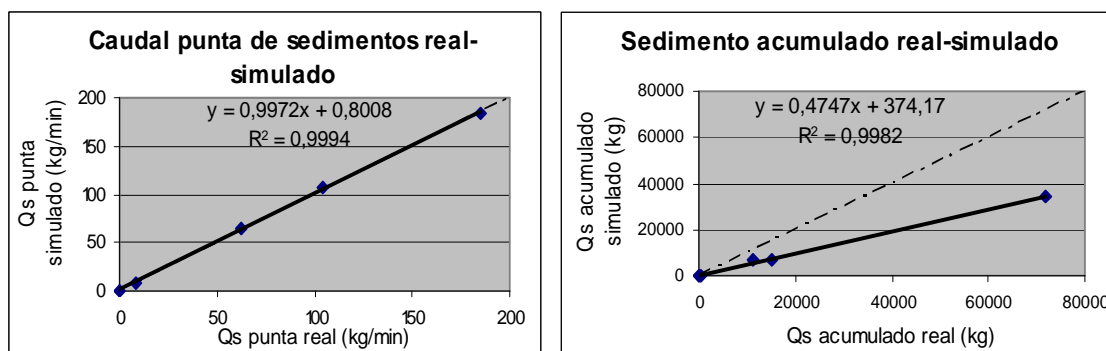
**Fig. 3.3.1.23.- Sedimentograma real y simulado**

Para una óptima calibración, se tuvo que reducir el valor de  $D_{50}$  en aproximadamente un 70% todos los eventos analizados (Tabla 3.3.1.24).

**Tabla 3.3.1.24.- Porcentaje en que se ha variado el parámetro  $D_{50}$**

Eventos	$\Delta D_{50}$ (%)
1	-76%
2	-73%
3	-
4	-75%
5	-73%
6	-52%
<b>Promedio</b>	<b>-70%</b>

Esto nos indica que el modelo subestima tanto el caudal de sedimentos como los sedimentos acumulados. En la figura 3.3.1.24 se analiza la fidelidad con la que el modelo simula el caudal punta de sedimentos y el total de los kilogramos acumulados después del evento.



**Fig. 3.3.1.24.- Comparación del caudal punta de sedimentos y los sedimentos acumulados reales con los simulados.**



Se observa que el coeficiente de regresión es bueno en ambos casos, muy cercano 1. En cambio, como sucede en los casos anteriores la pendiente de la ecuación del caudal punta de sedimento se acerca más a la bisectriz lo que quiere decir que simula mejor los valores punta y subestima los kilogramos acumulados de sedimento.

### 3.3.2.- Caso de estudio: Latxaga

En este apartado, tal y como se hizo en la cuenca de La Tejería, se evaluará el funcionamiento del modelo en los siguientes casos:

- Alimentando el modelo con datos recopilados a partir de formulaciones empíricas y de tablas impresas en el manual del modelo EUROSEM.
- Alimentando el modelo con datos recabados a campo mediante ensayos realizados con el simulador de lluvia.

La gran diferencia entre la situación experimental de la cuenca de Latxaga respecto a La Tejería es que en la primera no se instalaron sondas de humedad por lo que no dispondremos de esta información de forma directa; sino a través de las mediciones hechas por el Gobierno de Navarra (ver sitio oficial: [www.cuencasagrarias.navarra.es](http://www.cuencasagrarias.navarra.es)). A continuación se pasará a analizar los dos casos anteriormente citados para realizar una comparativa entre ambos, pero antes se mostrarán los eventos seleccionados para estudiar la respuesta del modelo.

#### 3.3.2.1.- Eventos seleccionados

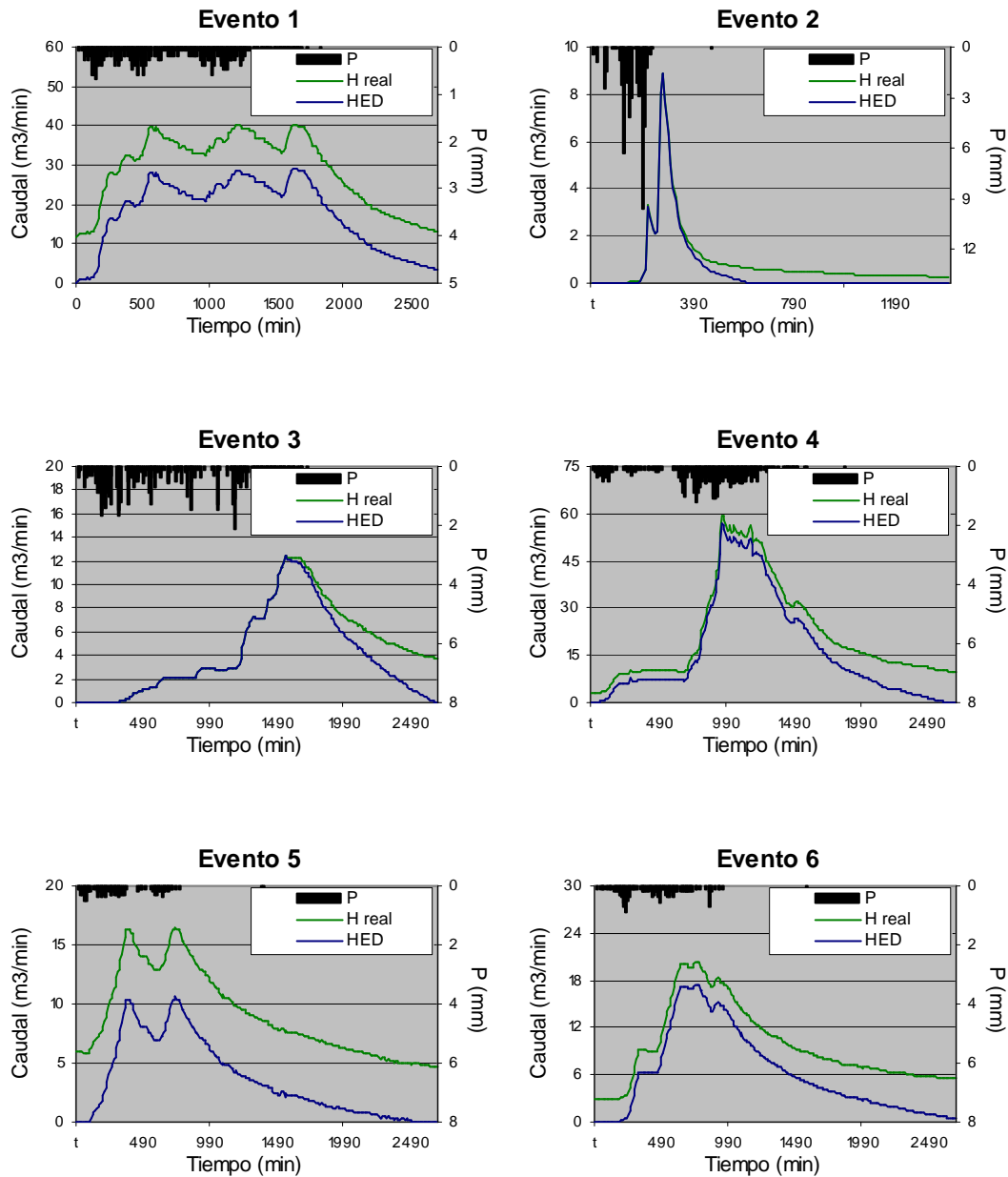
En el caso de Latxaga, se ha podido seleccionar un abanico más amplio de eventos ya que no se está limitado por la fecha en la que se midió la humedad edáfica. Por ello, se podría seleccionar cualquier evento, pero viendo los resultados obtenidos en La Tejería, se seleccionaron los eventos de mayor magnitud dado que parece que el modelo responde mejor a este tipo de eventos. Así, se pretende ver la respuesta del modelo, sin vernos obligados a reducir de forma considerable la conductividad hidráulica en saturación.

En la Tabla 3.3.2.1 se muestran las fechas de los eventos seleccionados junto a la precipitación acumulada para cada uno de ellos:

**Tabla 3.3.2.1.- Fecha de los eventos seleccionados y precipitación acumulada**

Evento	Fecha	Precipitación acumulada (mm)
1	10/02/2009	39,7
2	17/06/2009	45,7
3	23/12/2009	19,8
4	13/01/2010	46,6
5	30/01/2010	15,9
6	17/02/2010	23,6

A continuación, se representarán gráficamente los eventos seleccionados (Fig. 3.3.2.1), tanto el hidrograma real como el de escorrentía directa tras eliminar el flujo base.



**Fig.- 3.3.2.1.-** Hidrogramas reales y hidrogramas de escorrentía directa de los eventos seleccionados

Una vez que se han determinado los hidrogramas, se pasará a determinar los sedimentogramas reales. Para ello, se crearán rectas de regresión lineal valiéndonos de los datos de turbidez medidos en intervalos diezminutales. Así, cotejándolos con las muestras de sedimentos recogidos a las 3, 9, 15 y 21 horas, tendremos los pares de datos necesarios para crear una nube de puntos a la que se le ajustará una recta de regresión (Fig. 3.3.2.2).

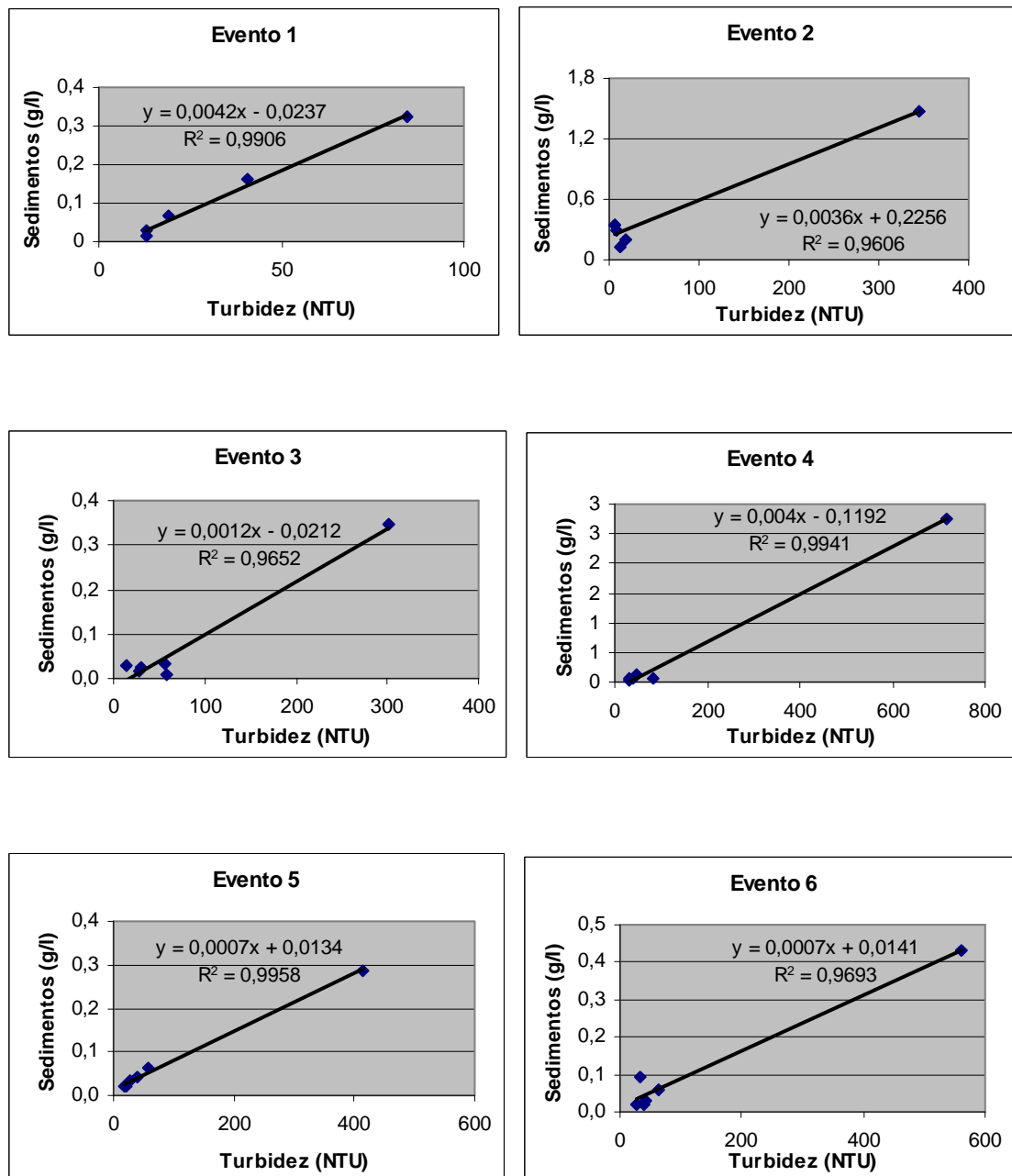
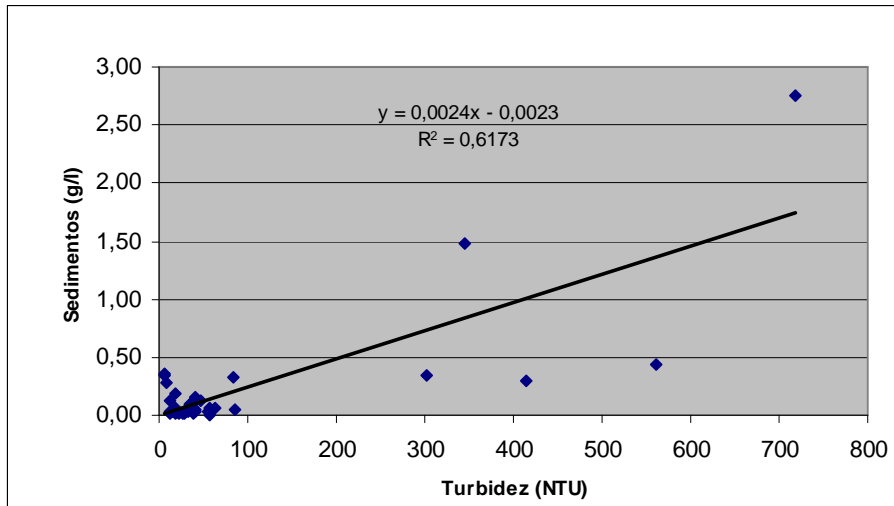


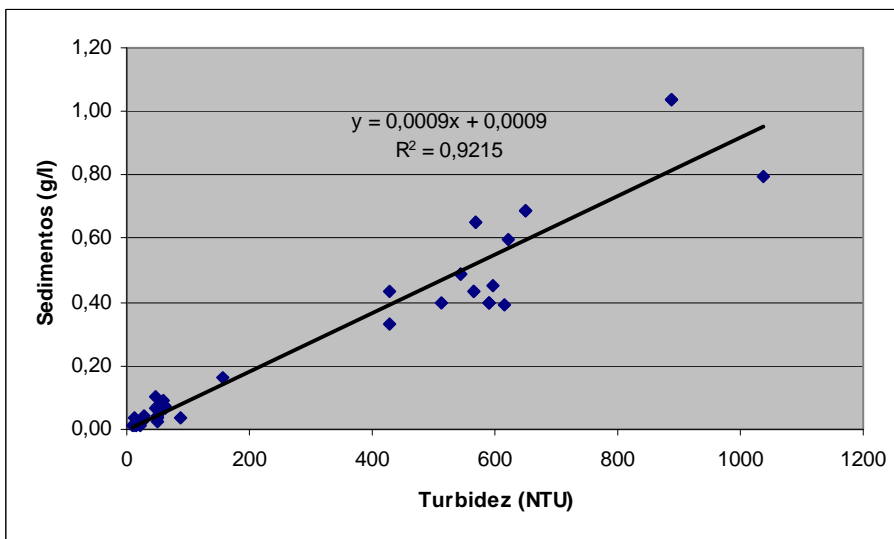
Fig. 3.3.2.2.-Rectas de concentración de sedimentos – turbidez

Como se puede apreciar el coeficiente de regresión de los eventos es alto, pero en la mayoría de los casos altamente condicionado por un único punto, por lo que se unirán todos los pares de datos de cada evento en uno para ver como se distribuye la nube de puntos (Fig. 3.3.2.3). Tal y como se observa en la figura anterior, la  $R^2$  disminuye de forma importante hasta un 0,61; por lo que evitaremos esta recta.



**Fig. 3.3.2.3.- Recta de concentración de sedimentos – turbidez considerando todos los eventos analizados**

Como último recurso recurriremos a la recta general calculada con datos del año 2003 hasta el 2007 (Fig. 3.3.2.4).



**Fig. 3.3.2.4.- Recta de concentración de sedimentos general**

Se observa que el coeficiente de regresión aumenta hasta 0,92 y existe una nube de puntos homogénea entorno a la recta, por lo que se empleará esta ecuación en los eventos 2, 3, 4, 5 y 6. Por otro lado, en el evento 1, sí que existe una continuidad en los puntos, siéndonos útil para calcular el sedimentograma. Los sedimentogramas reales y la cantidad acumulada se muestran en la Fig. 3.3.2.8 junto a los simulados por el modelo.

### 3.3.2.2.- Estimación de parámetros (según Díez, 2007)

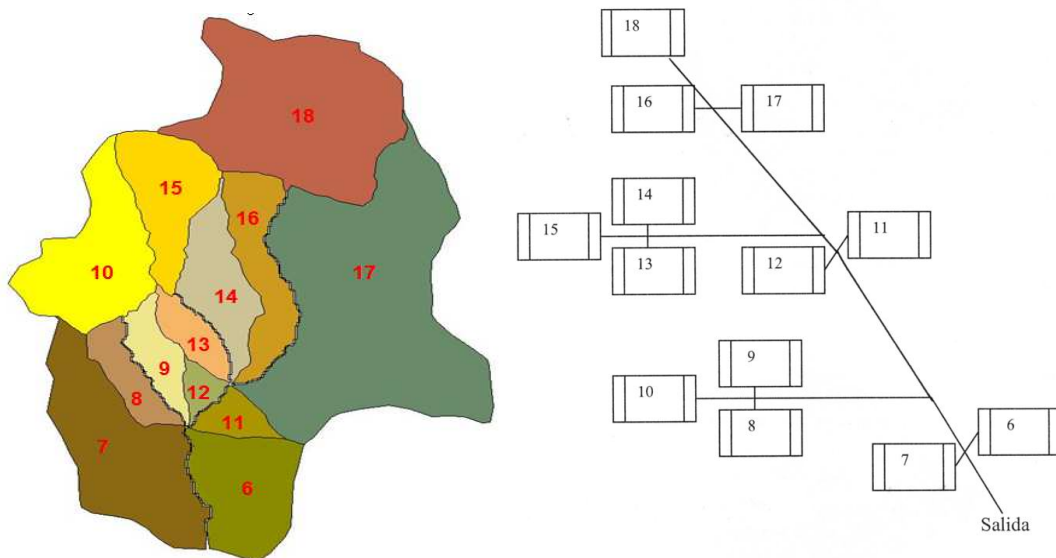
Tal y como se hizo en la cuenca de La Tejería, se caracterizarán los parámetros que son valores de entrada del modelo. Para ello, nos basaremos en los trabajos de Amezkua (2002) y Díez (2007).

Los parámetros de entrada del modelo se pueden dividir en cuatro grupos diferentes, y son los siguientes:

- Parámetros geométricos de la cuenca
- Parámetros hidráulicos de la cuenca
- Parámetros de erosión
- Parámetros relacionados con la vegetación

#### 3.3.2.2.1.- Parámetros geométricos de la cuenca

Para poder trabajar con el modelo EUROSEM debemos separar la cuenca en un conjunto de planos y canales que muestren un similar comportamiento hidrológico y erosivo, basándonos en un plano topográfico. Esta subdivisión se realizó en un trabajo anterior (Amezkua, 2002). A continuación se muestra la cuenca dividida en planos y su correspondiente esquema en forma de cascada (Fig. 3.3.2.5).



**Fig. 3.3.2.5.-** Subdivisión de la cuenca en planos y esquema en forma de cascada.

Las dimensiones de los planos y canales se obtuvieron en el trabajo de Amezkua, 2002. En la Tabla 3.3.2.2 se resume la longitud, la anchura y la pendiente para cada elemento, mientras que en la Tabla 3.3.2.3 se expone la anchura y el talud de los canales.

**Tabla 3.2.2.2.** Datos geométricos de longitud (XL), anchura (W) y pendiente (S)

Elemento	XL (m)	W (m)	S (m/m)
1	578,0		0,017
2	595,0		0,057
3	253,0		0,030
4	478,0		0,063
5	1025,0		0,043
6	399,3	364,6	0,192
7	923,7	258,7	0,064
8	215,7	250,5	0,134
9	202,3	255,1	0,102
10	877,2	213,4	0,096
11	331,9	102,7	0,207
12	203,5	102,7	0,225
13	187,8	229,5	0,089
14	650,5	160,5	0,117
15	765,4	163,3	0,106
16	289,8	380,3	0,193
17	1117,7	515,1	0,066
18	982,9	371,5	0,067

**Tabla 3.2.2.3.** Datos geométricos de anchura y talud de los canales

Canal	Anchura (m)	Talud
1	2,00	0,69
2	0,75	0,97
3	1,75	0,69
4	0,50	0,97
5	1,20	0,69

Una vez que se han obtenido los parámetros geométricos para alimentar el modelo se pasará a analizar los parámetros hidráulicos.

### 3.3.2.2.2.- Parámetros hidráulicos de la cuenca

En este apartado se va a caracterizar hidrológicamente la cuenca de Latxaga, calculando diferentes parámetros hidrológicos, que son los siguientes:

- $n$  de Manning
- Capilaridad efectiva ( $G$ )
- Porosidad ( $POR$ )
- Conductividad hidráulica en saturación ( $K_s$  o  $FMIN$ )

- **$n$  de Manning**

La  $n$  de Manning se calculó basándose en el artículo de Arcement y Schneider (1989), que trata de la selección de coeficientes de rugosidad en canales, y el de De Roo *et al.* (1995) donde indica el valor de  $n$  en laderas en función del cultivo. A continuación, en la Tabla 3.3.2.4 se muestran los valores obtenidos en para cada canal (Díez, 2007).

**Tabla 3.3.2.4.- Valores de los coeficientes de Manning para los canales de Latxaga**

Canales	$n_c$
C <sub>1</sub>	0,098
C <sub>2</sub>	0,038
C <sub>3</sub>	0,098
C <sub>4</sub>	0,089
C <sub>5</sub>	0,045

Basándonos en la Tabla A.2.1 (Anexo) (De Roo, 1995) determinaremos una  $n$  de Manning de 0,119 para todos los eventos ya que la cuenca está cubierta de cereal; exceptuando el evento de junio que tendrá un valor de 0,140.

- **Capilaridad efectiva ( $G$ )**

La capilaridad efectiva se relaciona con la textura del suelo en la Tabla A.2.2 (Anexo) (Woolhiser *et al.*; 1990). Así, en el trabajo de Díez 2007 se obtienen los siguientes valores (Tabla 3.3.2.5) para cada plano, teniendo en cuenta la distribución de suelos realizada en el trabajo de Amezkua 2002.

**Tabla 3.3.2.5.- Valores medios ponderados de  $G$  para cada elemento**

Elemento	Media ponderada $G$ (mm)
6 – 15	720
16	716,945
17	677,770
18	662,495

- **Porosidad ( $POR$ )**

La porosidad de los suelos ha sido obtenida a partir de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica. A partir de estos datos, se han utilizado las expresiones



obtenidas por Rawls y Brakensiek (1989). Los resultados se muestran en la Tabla 3.3.2.6 (Díez, 2007).

**Tabla 3.3.2.6.- Media ponderada porosidad para cada elemento**

Planos	$\phi$ (v/v)
6	0,535
7	0,527
8	0,538
9	0,525
10	0,531
11	0,543
12	0,543
13	0,525
14	0,534
15	0,527
16	0,527
17	0,539
18	0,535

- Conductividad hidráulica en saturación ( $K_s$  o  $FMIN$ )**

La conductividad se ha calculado empleando la fórmula de Brankesiek detallada en el apartado anterior que lo relaciona con la textura del suelo. En la Tabla 3.3.2.7 se muestran los resultados obtenidos (Díez, 2007).

**Tabla 3.3.2.7. Conductividad hidráulica en saturación en cada plano**

Planos	$K_s$ (mm/h)
6	2,32
7	2,11
8	2,28
9	2,11
10	2,45
11	2,40
12	1,80
13	1,84
14	2,42
15	2,12
16	1,85
17	2,65
18	2,46

### 3.3.2.2.3.- Parámetros de erosión de la cuenca

Se dividen en dos grandes grupos:

- Parámetros de erosión por salpicadura
  - PLANTH
  - EROD
  - RECS
  - RFR
- Parámetros de erosión por escorrentía
  - COH
  - D<sub>50</sub>

A continuación se analizará cada parámetro individualmente:

- **PLANTH**

Se trata de la altura efectiva de la planta e interviene en la energía de la gota de lluvia en el drenaje de las hojas. La mayoría de eventos se encuentran comprendidos entre noviembre y febrero por lo que este valor oscilará entre 0 y 5 cm. A partir de estas fechas irá aumentando conforme avanza el ciclo del cultivo.

- **EROD**

Dicho parámetro se encuentra definido en la Tabla A.2.3 (Poesen *et al.*; 1985). Para la cuenca de Latxaga será un valor de 1,7g/J ya que la textura predominante es franco arcillosa.

- **RFR**

En la Tabla 3.3.1.9 se recogen los valores obtenidos para la cuenca de La Tejería, que se extrapolarán a Latxaga ya que el manejo es similar en ambas cuencas.

- **RECS**

Es un parámetro que hace referencia a la rugosidad del terreno, este valor fue medido en el trabajo de Larrañaga (2006), obteniéndose un valor medio de 125,5 mm.

- **COH**

Se trata de la cohesión del suelo en saturación medido mediante un instrumento Torvane y expresado en kPa. Dicho valor se encuentra en la tabla A.2.4 y tabla A.2.5 (Anexo); el primero hace referencia a la cohesión dependiendo de la textura y el segundo el incremento correspondiente a cada cultivo (Vickers, 1993). Así, la cohesión será la suma de los valores obtenidos en las anteriores tablas.

En la cuenca de Latxaga, la textura predominante es franco-arcillo-limosa, por lo que el valor de COH debido a la textura del suelo es 9 KPa. A este valor, se debe añadir el incremento del valor de la cohesión del suelo debido al cultivo. En la cuenca el cultivo predominante es el cereal (trigo y cebada), por lo que se deberá incrementar 0,4 kPa. Así que el valor total de la cohesión del suelo en la cuenca de Latxaga es de 9,4 kPa. En los períodos de tiempo en los que no haya germinado el cereal y no haya ningún cultivo, el valor de COH será 9 kPa (Díez, 2007).

- **D<sub>50</sub>**

En el trabajo de Amezkua (2002) se calculó el tamaño de partícula para cada tipo de suelo, y en el trabajo de Díez (2007) se solapó en mapa de suelos con el de planos, obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 3.3.2.8).

**Tabla 3.3.2.8.-** Valores de *D<sub>50</sub>* (μm) obtenidos para cada plano en la cuenca de Latxaga

Planos	<i>D<sub>50</sub></i> (μm )
6	73
7	67
8	75
9	65
10	70
11	80
12	61
13	68
14	73
15	65
16	70
17	73
18	70

#### 3.2.2.2.4.- Parámetros relacionados con la vegetación

Se analizarán los mismos parámetros que fueron estudiados en la cuenca de La Tejería:

- COVER
- DINTR
- PLANGE
- SHAPE
- PBASE

Se trata de parámetros relacionados con el cultivo y la fecha del año en la que nos encontramos.

- **COVER**

Se trata de la superficie del suelo ocupada por el cultivo. Estos valores se encuentran en la Tabla A.2.6 (Anexo) (De Roo, 1995). En ella se observa que para los periodos de otoño e invierno el valor es (cerca a) 0. Mientras que para el evento de junio será de 0,55.

- **DINTR**

Este parámetro nos da información sobre la máxima capacidad de interceptación de la cubierta vegetal. Depende principalmente del tipo de cultivo y de la época del año en la que nos encontramos. Este parámetro se encuentra en la tabla A.2.7. (Anexo). Adoptará un valor de 3, cuando el cereal esté alto. Para la mayoría de nuestros eventos será nulo.

- **PLANGE y SHAPE**

En la Tabla A.2.9 (Anexo) se hace referencia al ángulo medio formado por el tallo de la planta con el suelo (PLANGE) y de la forma del cultivo (SHAPE). El primero tomará un valor de 85° mientras que el segundo tomará un valor de 1 ya que se trata de cultivos de hoja estrecha.

- **PBASE**

Se trata de la proporción de suelo ocupada por el tallo de la planta. Dicho valor se encuentra en la Tabla A.2.8 (Anexo) (Holtan, 1961). En nuestro caso tomará un valor de 0 en la mayoría de eventos porque todavía no habría crecido el cereal. Para eventos de primavera el valor será de 0,25.

**3.2.2.3.- Calibración del modelo (según Díez, 2007)**

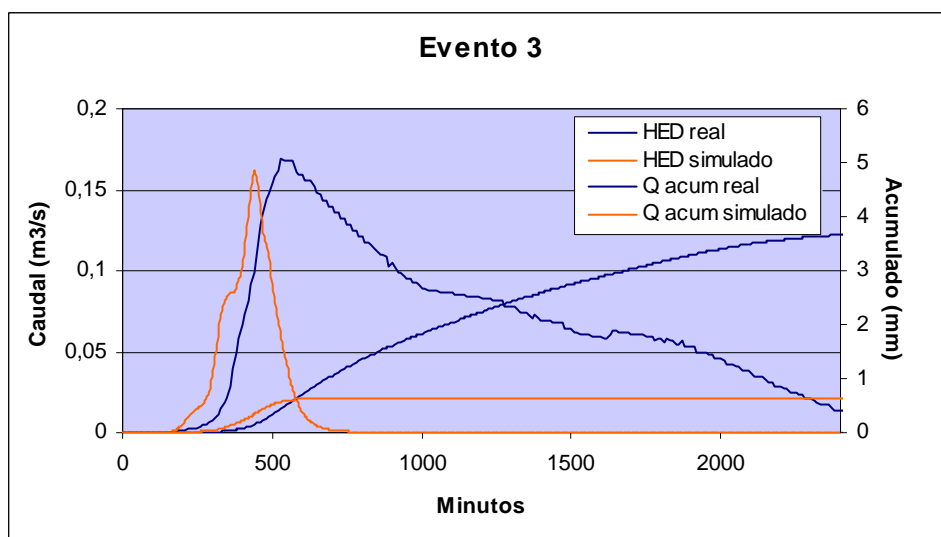
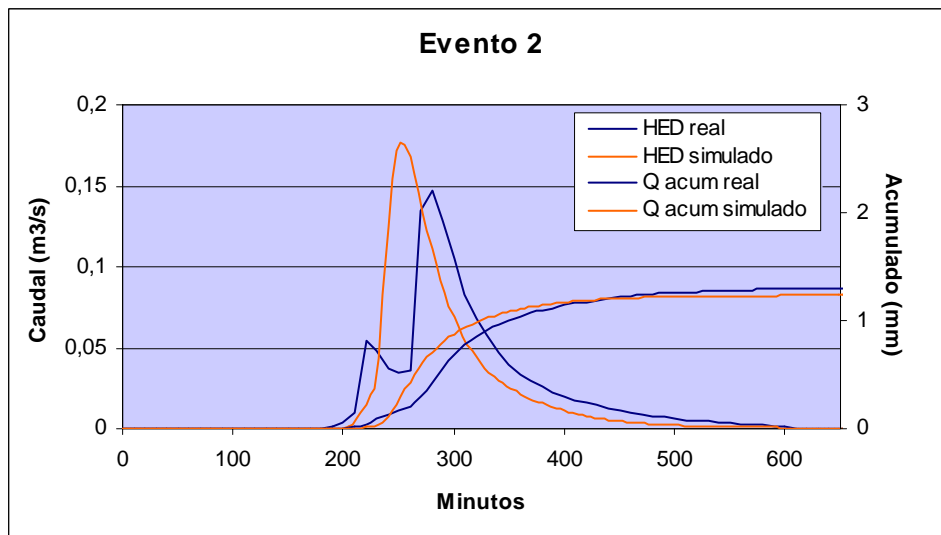
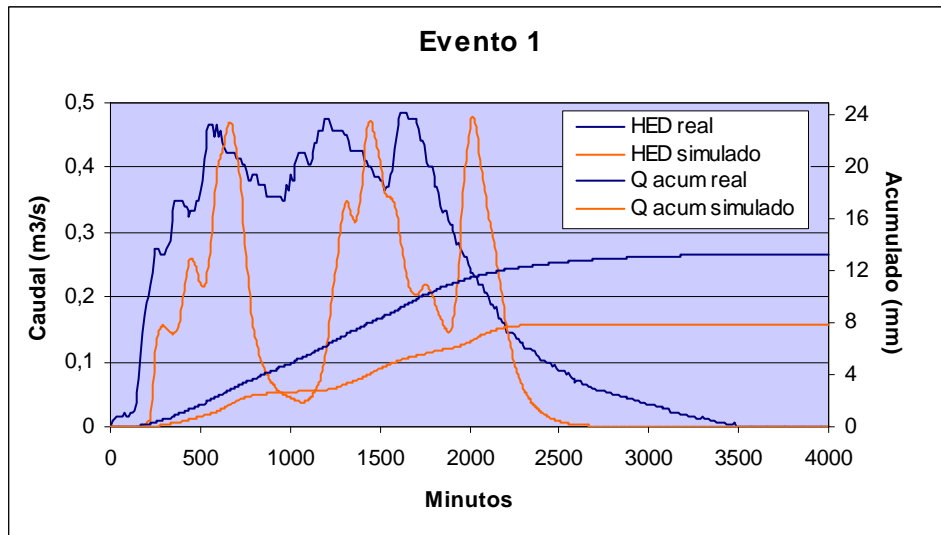
Una vez determinados los parámetros de los archivos de entrada, se correrá el modelo obteniendo una respuesta hidrológica y erosiva. Dicha respuesta habrá que calibrarla modificando los parámetros más sensibles, para ajustarlo al resultado real obtenido con anterioridad.

Para la calibración del hidrograma se intentará igualar el caudal punta del simulado por el modelo con el real; mientras tanto, para el sedimentograma se utilizará el caudal punta de sedimentos como criterio de calibración. En la Tabla 3.3.2.9 se muestran el caudal punta, así como la descarga punta de sedimento para cada evento.

**Tabla 3.3.2.9.- Caudal y descarga punta para cada evento**

Evento	Q punta (m <sup>3</sup> /s)	Qs punta (kg/min)
1	0,484	19,11
2	0,147	33,85
3	0,168	11,94
4	0,917	51,01
5	0,176	7,21
6	0,291	12,27

Tal y como se hizo en el caso de La Tejería, el parámetro más sensible para la calibración del hidrograma es la conductividad hidráulica en saturación (FMIN); mientras que los parámetros más sensibles en la calibración del comportamiento erosivo son el tamaño de partícula ( $D_{50}$ ) y la cohesión (COH). En la siguiente recopilación de gráficos (Fig. 3.3.2.6) se muestran los resultados obtenidos tras la calibración del hidrograma.



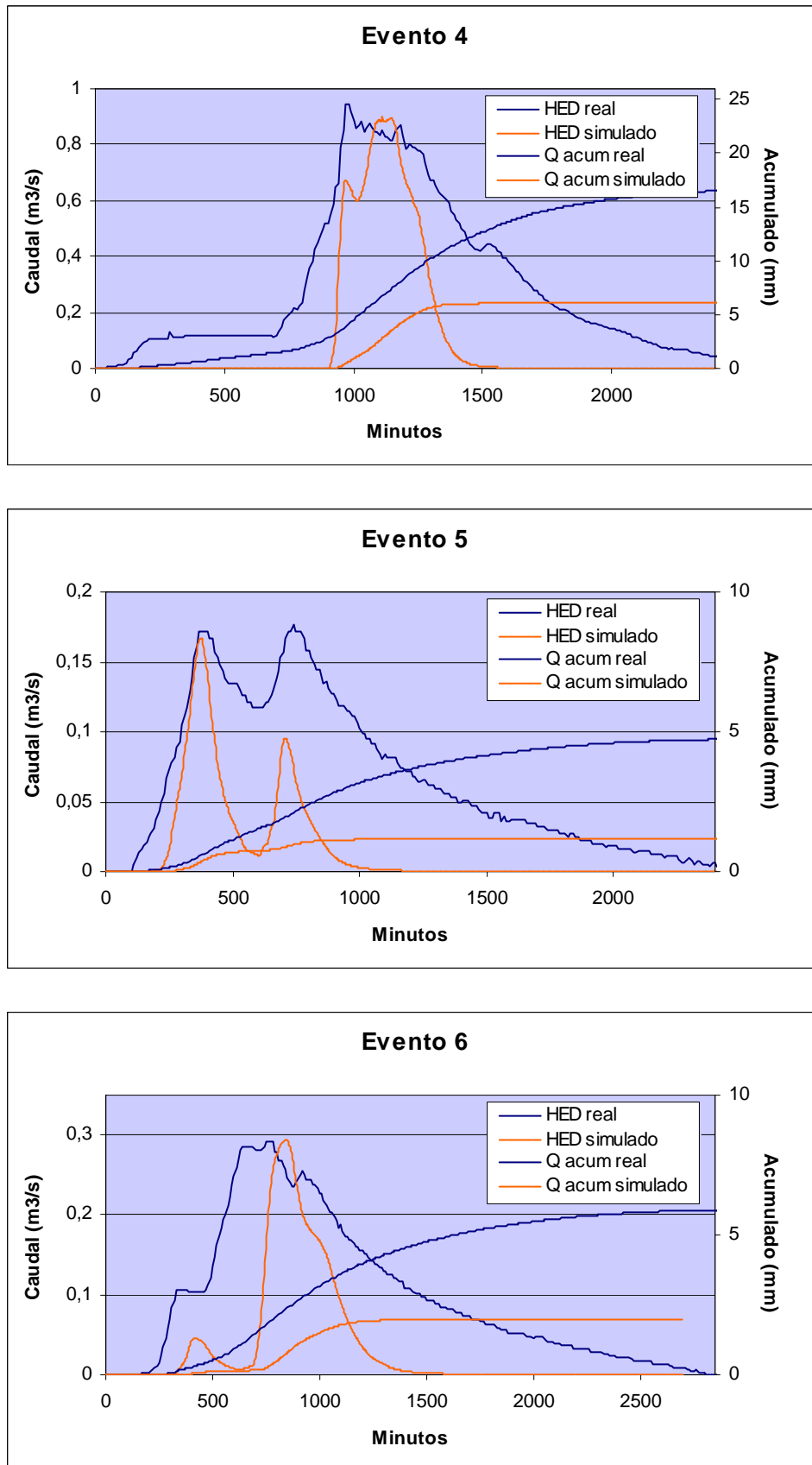


Fig. 3.3.2.6.- Calibración de los hidrogramas para los eventos seleccionados

A continuación, se mostrará (Tabla 3.3.2.10) el porcentaje que se ha tenido que

reducir la conductividad hidráulica en saturación para cada caso concreto.

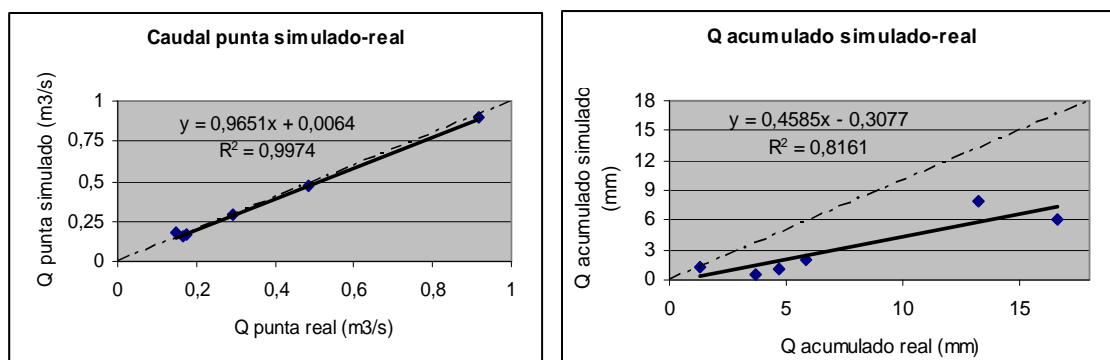
**Tabla 3.3.2.10.-Porcentaje de variación de FMIN para la calibración**

Evento	$\Delta$ FMIN (%)
1	-83
2	+237
3	-18
4	-48
5	-78
6	-79
<b>Media</b>	<b>-16</b>

Como se puede observar en la tabla anterior, existe gran variabilidad en los porcentajes que se ha de modificar. Para todos los eventos otoñales e invernales, es decir, todos salvo el dos, la conductividad se ha tenido que disminuir. En el evento 2, sucedido en junio, la precipitación acumulada es de volumen considerable recogido en poco tiempo. Por lo que en dichos casos el modelo sobre estima el hidrograma.

En el resto de eventos estudiados, nos vemos en la necesidad de reducir la conductividad hidráulica en saturación, en algunos casos, en valores entorno al 80%. Así, nos da una media que disminuye un 16%, pero el valor del evento 2 condiciona grandemente la tendencia de los datos. De esa forma, eliminando dicho valor, nos daría una media del 64%, algo que se ajusta mejor observando el resto de eventos.

Una vez realizado la calibración se verá como se ajusta la simulación a la realidad (Fig. 3.3.2.7). Para ello, se compararan los caudales punta reales con los simulados, así como la cantidad acumulada a lo largo del evento.



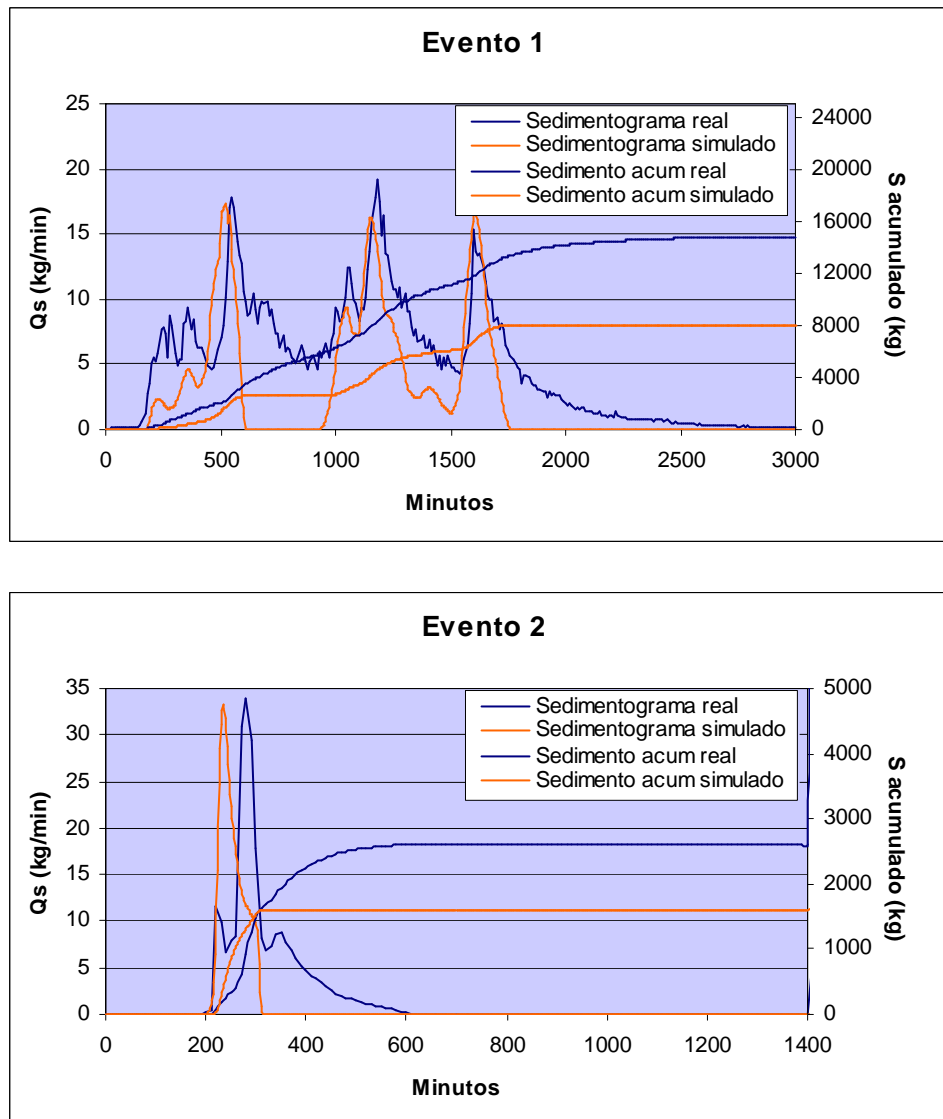
**Fig. 3.3.2.7.- Comparación del caudal punta y caudal acumulado real con el simulado**

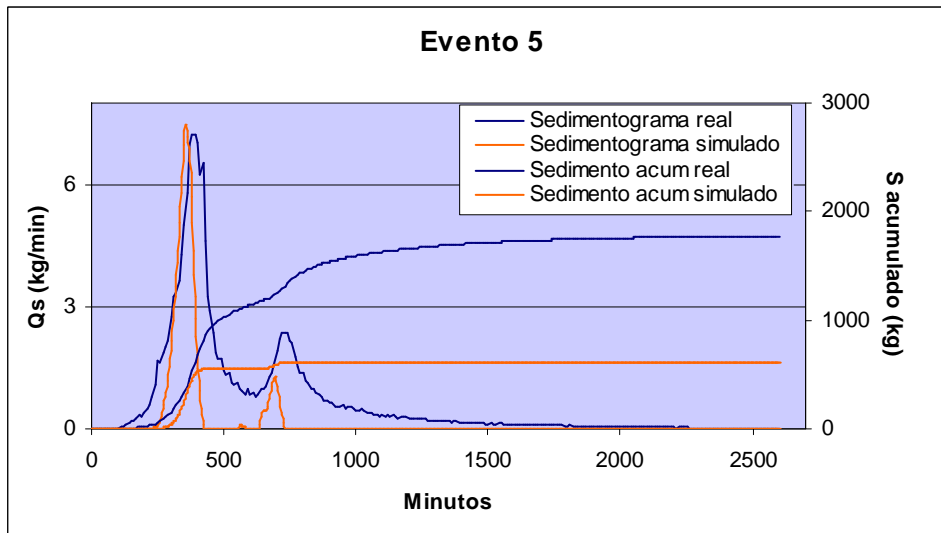
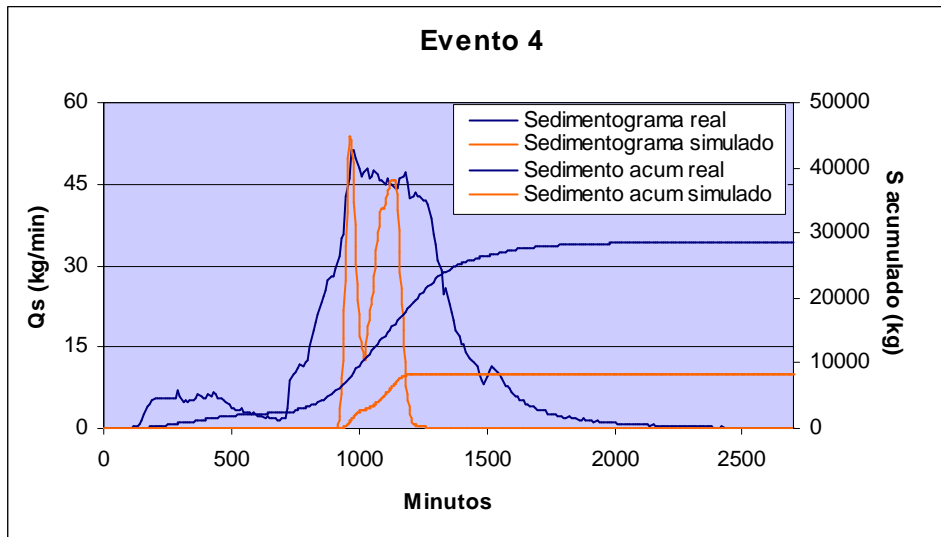
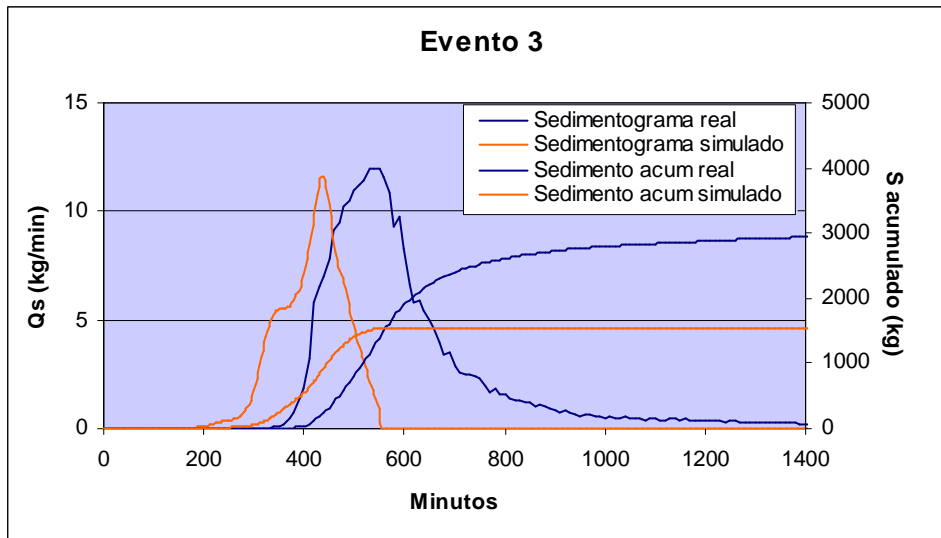
En la Fig. 3.3.2.7 podemos observar que el caudal punta simulado se ajusta muy

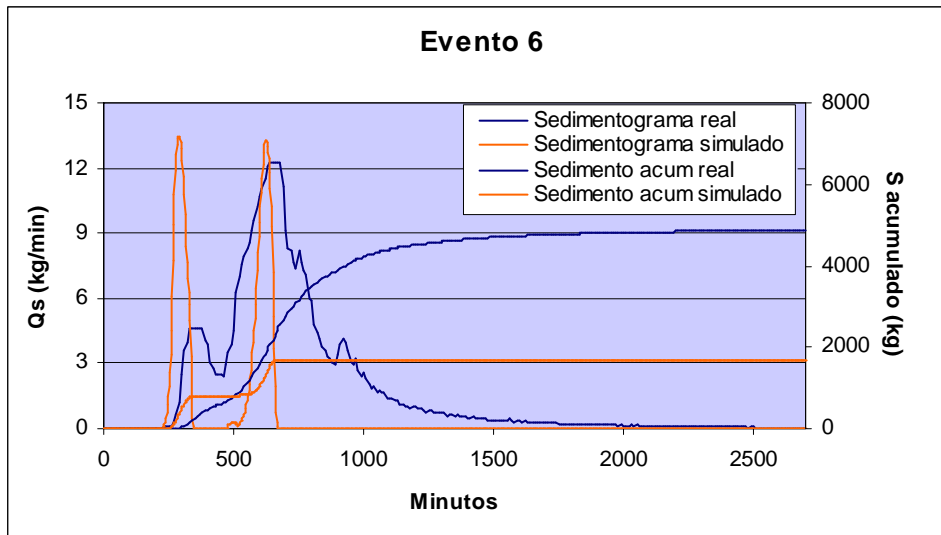


bien a la realidad, ya que sigue la bisectriz muy bien. Además, la  $R^2$  es de 0,99 por lo que la correlación es muy buena. Por otro lado, observando lo conseguido en el gráfico del caudal acumulado, la pendiente de la recta dista bastante de la bisectriz por lo que el modelo subestima el caudal acumulado. Además, el coeficiente de regresión se reduce a un 81% debido que en los eventos con más de un pico se suele subestimar alguno de ellos.

Tras realizar la calibración de los hidrogramas, se hará lo propio con los sedimentogramas (Fig. 3.3.2.8).







**Fig. 3.3.2.8.-** Sedimentogramas para cada evento

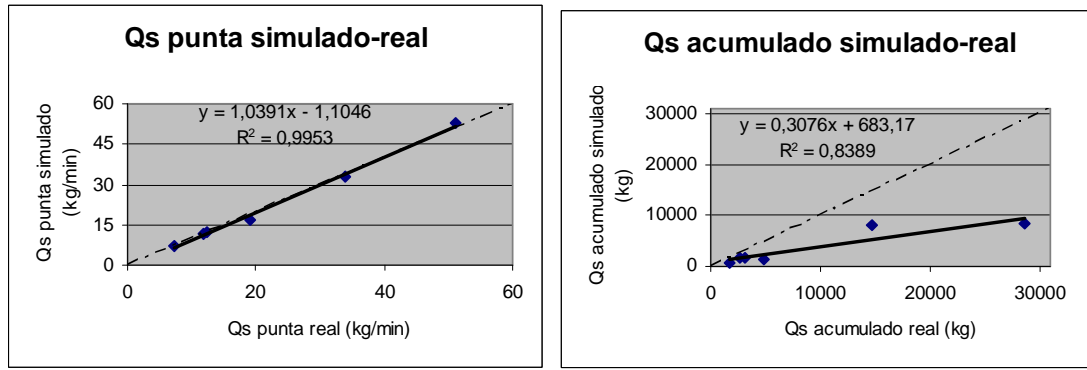
En la Tabla 3.3.2.11 se indica el incremento porcentual del valor del parámetro  $D_{50}$  (tamaño de partícula en  $\mu\text{m}$ ) realizado a los fines de la calibración. Cabe aclarar, que se prefirió no modificar los valores de cohesión del suelo ya que éstos provenían de datos experimentales (recabados a campo).

**Tabla 3.3.2.11.-** Porcentaje de variación del  $D_{50}$  para la calibración

Evento	$\Delta D_{50}$ (%)
1	-20
2	-6
3	-31
4	-18
5	-26
6	-28
<b>Media</b>	<b>-21</b>

Se puede apreciar que en el evento 2, es donde menos se tuvo que reducir el valor de  $D_{50}$  (Tabla 3.3.2.11), tan sólo un 6%. Aun así, para el resto de eventos el porcentaje de variación (concretamente, de reducción) es relativamente bajo. De esta forma, obtenemos una media de reducción de 21%.

A continuación se compararán los valores de salida del modelo con los datos reales de caudal de sedimento punta y sedimento acumulado a lo largo del evento (Fig. 3.3.2.9).



**Fig. 3.3.2.9.-** Comparación del caudal punta de sedimentos y acumulado real con el simulado

Tal y como viene sucediendo hasta ahora, al emplear como criterio de calibración que los caudales punta de sedimento coincidan, se consigue una buena aproximación a la bisectriz, y así a la realidad. Además, el coeficiente de regresión que presenta es muy elevado, 0,99. En cambio, en el caso de los sedimentos, el modelo subestima la cantidad de suelo erosionado, tal y como se puede apreciar en todos los sedimentogramas de los eventos estudiados. Así, se puede observar que la pendiente de la recta dista de la bisectriz.

**3.2.2.4.- Evaluación de variables medidas en campo**

El valor de los parámetros de entrada del modelo no siempre es fácil de determinar. Es por esto que los modelos facilitan ciertos valores en base a tablas – normalmente empíricas– definidas por rangos cualitativos. Evidentemente, la entrada de un valor erróneo o inapropiado, según la sensibilidad del modelo a este valor, puede generar resultados alejados de la realidad (Salvany, 1996). Por ello, tal y como se realizó en la cuenca de La Tejería algunos de los parámetros que interfieren significativamente en el ciclo hidrológico y erosivo fueron medidos en campo. Precisamente, estos valores se sustituirán por los aportados en Díez (2007). Estos son los parámetros que variarán en el archivo paramétrico del modelo:

- Parámetros hidrológicos de la cuenca:
  - Conductividad hidráulica en saturación (*FMIN*)
- Parámetros erosivos de la cuenca:
  - Cohesión del suelo saturado (*COH*)
  - Energía de la gota de lluvia (*EROD*)

Puesto que los parámetros fueron medidos en los distintos suelos en que se dividió la cuenca, se realizará una media ponderada dependiendo del porcentaje de suelo que existe para cada plano. Para ello, se cruzaron el mapa de suelos con el de planos y canales de la cuenca. En la Tabla 3.3.2.12 se muestra el porcentaje correspondiente al Suelo L1 (unión del Suelo L1 y suelo L2) y Suelo L3. A su vez, el suelo 0 hace referencia a afloramientos rocosos (no suelos).

**Tabla 3.3.2.12.- Porcentaje de cada tipo de suelo por plano. Suelo 0: afloramientos rocosos.**

Plano	Suelo 0	Suelo L1	Suelo L3
6	8,3	43,1	48,6
7	0	93,8	6,2
8	0	42,3	57,7
9	0	98,5	1,5
10	0	100	0
11	0	11,3	88,7
12	0	100	0
13	0	66,1	33,9
14	0	67,9	32,1
15	0	99,9	0,1
16	20,9	46,1	33
17	19,9	41,4	38,7
18	20,5	41,6	37,9

A continuación se pasará a estudiar cada parámetro mencionado anteriormente, empleando el mismo procedimiento que en La Tejería (ver sección precedente).

○ *Conductividad hidráulica en saturación (FMIN)*

La conductividad hidráulica en saturación no es un parámetro que se haya medido directamente en campo. Para su determinación se han empleado los resultados de infiltración inferidos, a su vez, a través de los ensayos de simulación (precipitación-escorrentía), ya que en saturación, el valor de la tasa de infiltración cuando ésta se hace constante se equipara a la conductividad hidráulica en saturación.

En este caso poseemos seis ensayos correspondientes al Suelo L1 (ya que estadísticamente el Suelo L1 no se presentaba significativamente diferente al Suelo L2, ver arriba), y tres correspondientes al Suelo L3. Los valores anteriormente mencionados se recogen en la Tabla 3.3.2.13. En el repetición 1 del Suelo L2, la curva no se hace constante por la que se ha prescindido de este dato.

**Tabla 3.3.2.13.- Tasa de Infiltración final o básica de los diferentes cada suelo**

Repetición	Suelo L1 (mm/h)	Suelo L2 (mm/h)	Suelo L3 (mm/h)
1	14,2	-	31,2
2	16,7	29,7	29,7
3	21,1	16,8	26,9
<b>Promedio</b>	<b>20,3</b>		<b>29,3</b>

Los resultados para cada plano se mostraran en la Tabla 3.2.2.16; al suelo 0 (afloramientos rocosos) se le asignó un valor de conductividad hidráulica igual a cero.

○ *Cohesión del suelo saturado (COH)*

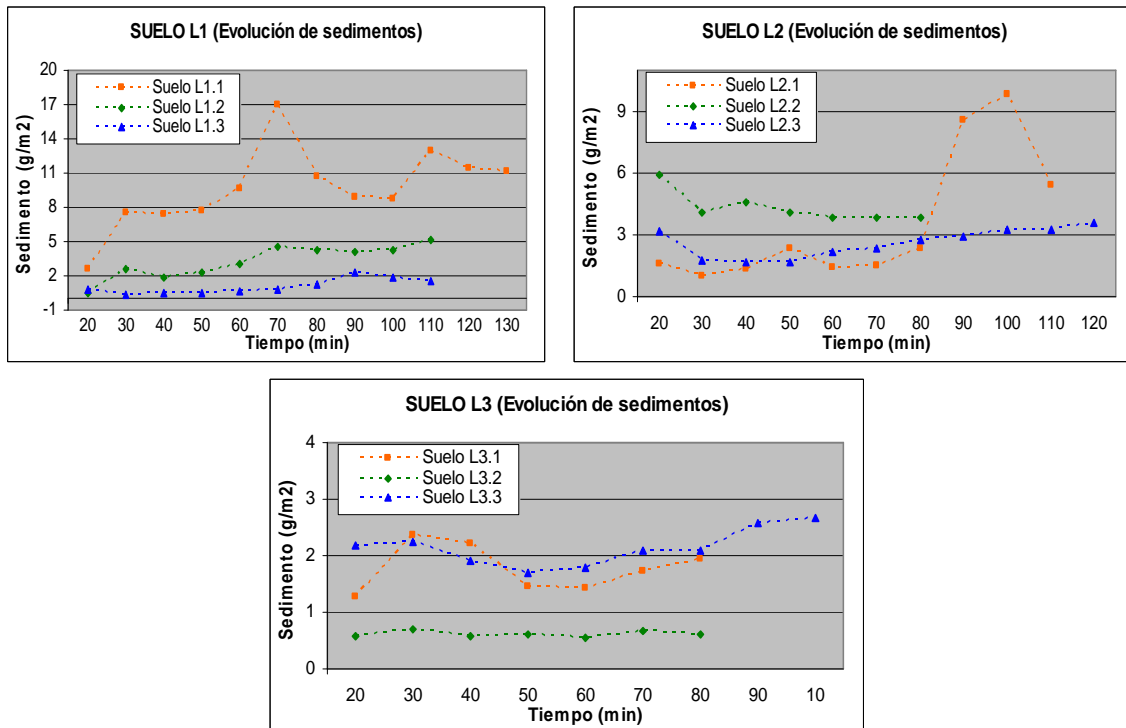
Tal y como se sugiere en el tutorial del propio modelo, se empleó un instrumento Torvane para medir la cohesión del suelo; pero, aunque no formaba parte de las especificaciones, se optó previamente por llevar el suelo a saturación, a los fines comparativos. Las mediciones se realizaron en los tres suelos iniciales y tras un análisis estadístico se determinó que no existían diferencias significativas entre el Suelo L1 y L2. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.3.2.14. A su vez los resultados calculados para cada plano que componen la cuenca se recogen en la Tabla 3.3.2.16.

**Tabla 3.2.2.14.-** Valores de cohesión (COH) de los diferentes suelos

Repeticiones	Suelo L1 (kPa)	Suelo L2 (kPa)	Suelo L3 (kPa)
1	83,3	73,5	44,1
2	78,4	78,4	49,0
3	83,3	69,5	49,0
4	58,8	83,3	34,3
5	68,6	53,9	58,8
6	79,3	83,3	58,8
7	68,6	53,9	49,0
8	72,5	78,4	53,9
9	49	76,4	29,4
10	49,9	68,6	24,5
<b>Media</b>	<b>70,6</b>		<b>45,1</b>

○ *Energía de la gota de lluvia (EROD)*

Para calcular la energía de la gota de lluvia se recurrió a la *eq. 2.18* empleada en la cuenca de la Tejería (Cooper, 2008), obteniéndose un valor aproximado de  $6,17 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Las pérdidas de suelo por unidad de superficie ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (Tabla 3.3.2.15) se calcularán a partir de los ensayos de simulación, tomando un valor en el que la curva del arranque de sedimentos se haga constante (Fig. 3.3.2.10).

**Fig. 3.3.2.10.-** Evolución de los sedimentos en  $\text{g}/\text{m}^2$  para cada suelo

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.3.2.15, referidos a los valores cuando las curvas se hacen constantes:

**Tabla 3.3.2.15.-** Sedimentos generados por unidad de energía cinética de la lluvia.

Ensayo	Suelo L1 (g/J.mm <sup>-1</sup> )	Suelo L2 (g/J.mm <sup>-1</sup> )	Suelo L3 (g/J.mm <sup>-1</sup> )
1	1,65	-	0,27
2	0,72	0,61	0,09
3	0,3	0,5	0,39
<b>Promedio</b>	<b>0,539</b>		<b>0,255</b>

Los resultados por plano de los distintos parámetros se indican en la Tabla 3.3.2.16.

**Tabla 3.2.2.16.-** *FMIN, COH y EROD por cada plano de Latxaga.*

Plano	FMIN (mm/h)	COH (kPa)	EROD (g/J)
6	20,07	57,1	9,7
7	20,49	69,0	13,0
8	22,03	55,9	9,4
9	20,35	70,2	13,4
10	20,30	70,6	13,5
11	22,96	48,0	7,2
12	20,30	70,6	13,5
13	21,32	61,9	11,1
14	21,26	62,4	11,2
15	20,30	70,5	13,5
16	17,05	59,9	10,5
17	17,42	58,2	10,1
18	17,28	58,4	10,1



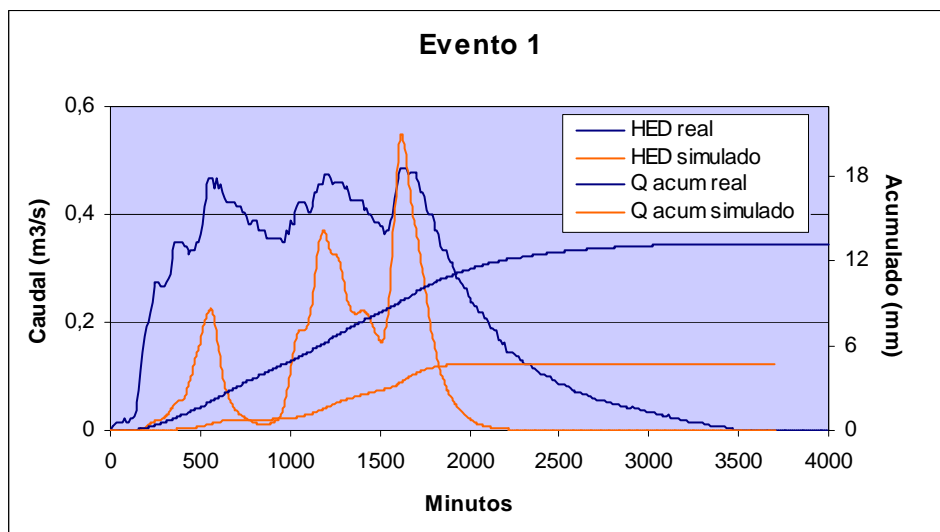
### 3.3.2.5.- Calibración del modelo incorporando datos experimentales

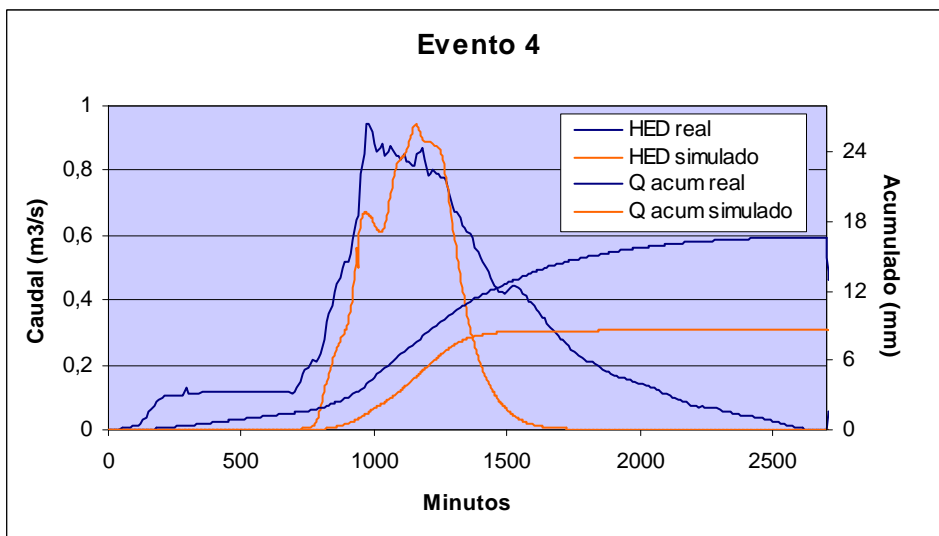
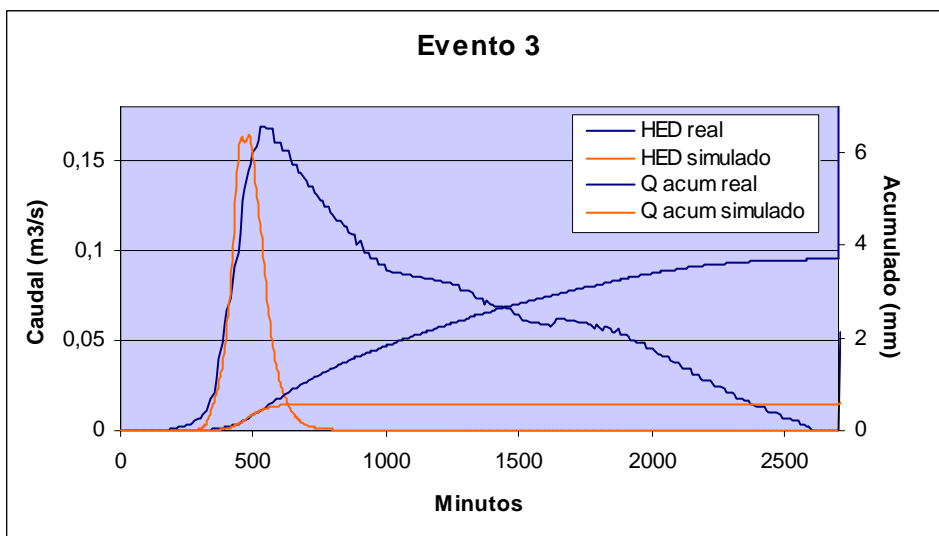
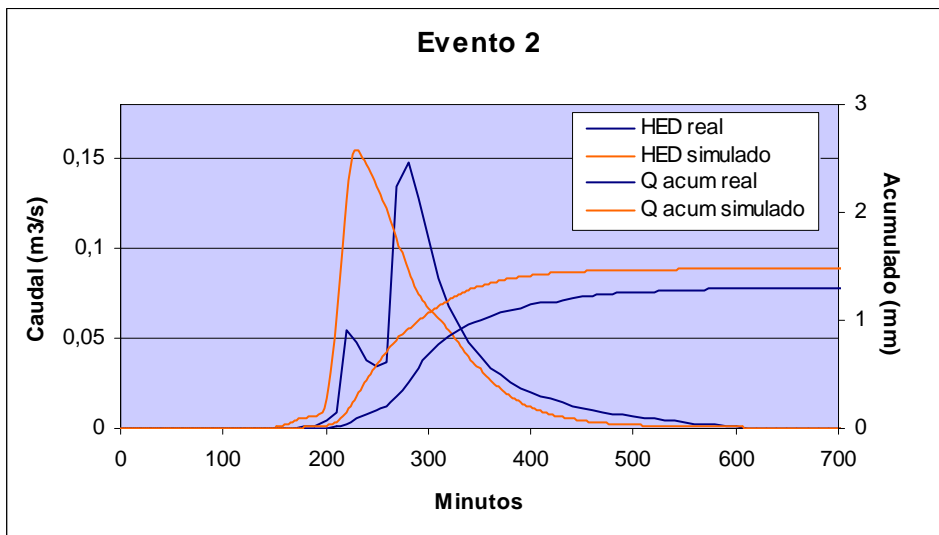
Tras estimar los nuevos parámetros de entrada, éstos se sustituirán en el archivo paramétrico para luego ejecutar el modelo y comparar esta nueva simulación con los resultados obtenidos con los datos anteriores.

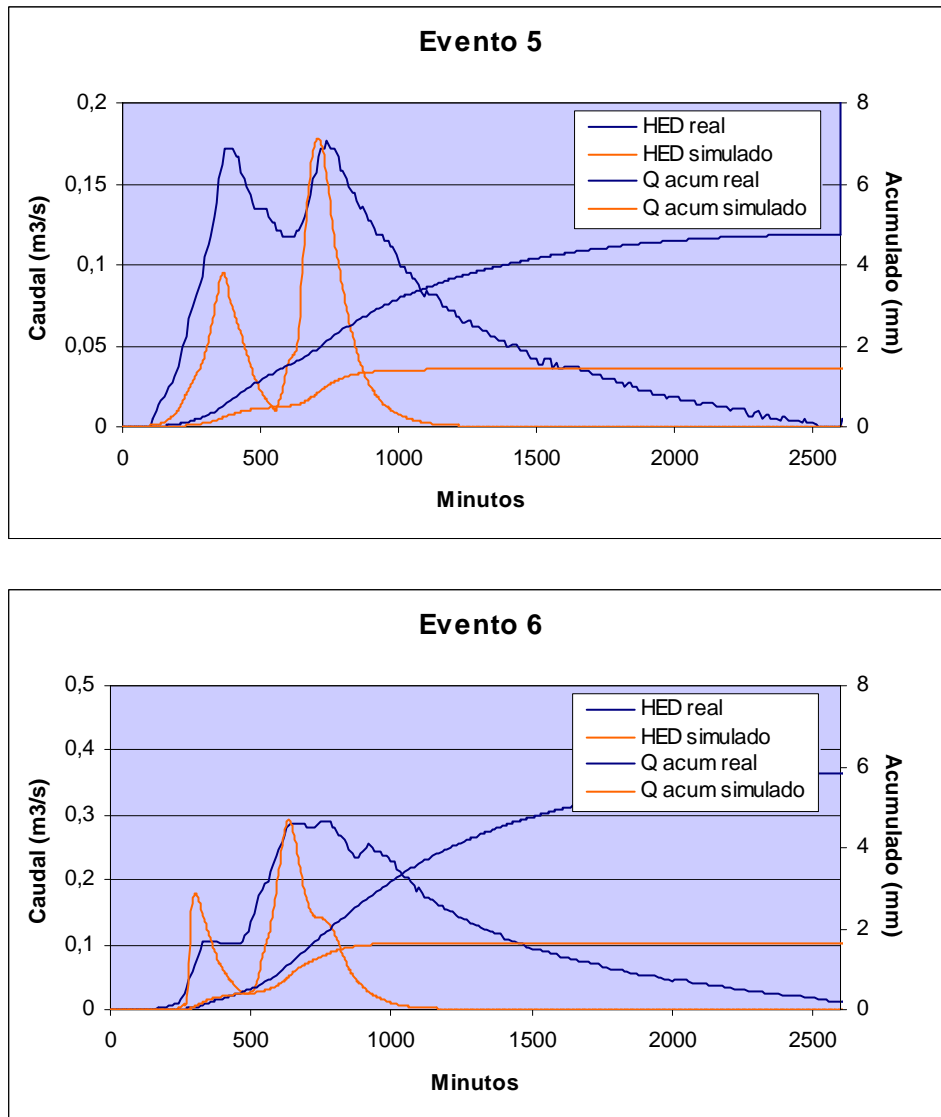
Cabe aclarar que, en la calibración, se tomó el criterio de no modificar, en lo posible, los valores de los parámetros medidos en campos. Es decir, se intentó calibrar el hidrograma, sin modificar el valor de la conductividad hidráulica en saturación, pero el modelo no daba respuesta en forma de escorrentía ya que los valores medidos son muy altos. Así, se trato de reducir la porosidad dentro de unos valores aceptables dentro de la clase textural del suelo; aun así, el modelo simulaba una escorrentía nula.

Como último recurso se optó por calibrar el hidrograma reduciendo el parámetro FMIN (conductividad hidráulica en saturación), pero también se redujo el valor de la rugosidad de la superficie del terreno dentro de los valores medidos en campo (Tabla 3.3.1.9) hasta un valor de 26 cm, para que en el terreno se quede atrapado menos volumen de agua y la escorrentía sea mayor dando como resultante una proporción menor de la reducción de la conductividad hidráulica en saturación.

Trabajando de la forma descrita anteriormente, los resultados obtenidos para la calibración de los hidrogramas se muestran en la Fig. 3.3.2.11.







**Fig. 3.3.2.11.-** Calibración de los hidrogramas para los eventos seleccionados

En la Tabla 3.3.2.17 se indica el porcentaje que se tuvo que variar los valores de conductividad hidráulica en saturación a los fines de la calibración.

**Tabla 3.3.2.17.-** Porcentaje que disminuye el parámetro FMIN para la calibración del hidrograma

Evento	$\Delta$ FMIN (%)
1	-97
2	-70
3	-97
4	-97
5	-99
6	-99
<b>Media</b>	<b>-93</b>

Como se puede apreciar el porcentaje que se tuvo que reducir es muy elevado (93% de media).

A continuación, trataremos de ver la calidad de las simulaciones comparando el caudal punta y el volumen acumulado real con el que nos proporciona el modelo (Fig. 3.3.2.12).

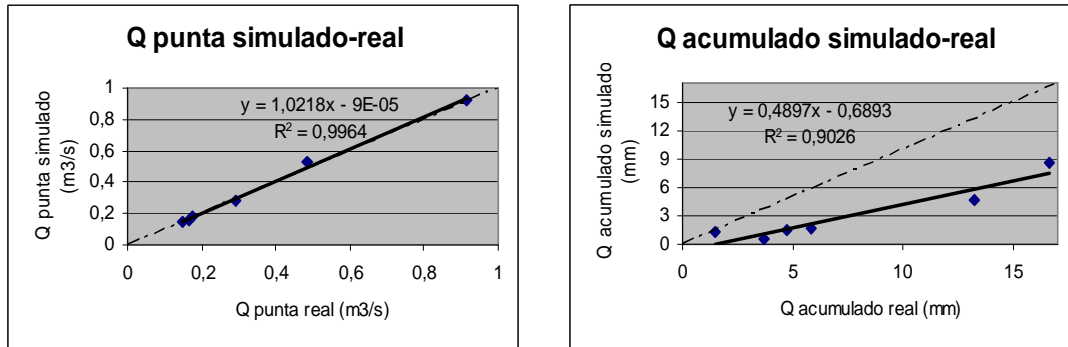
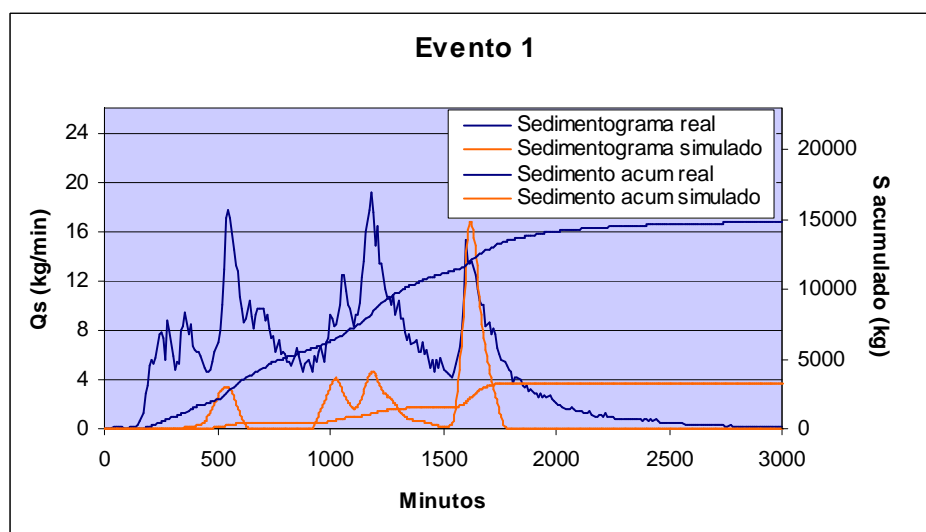
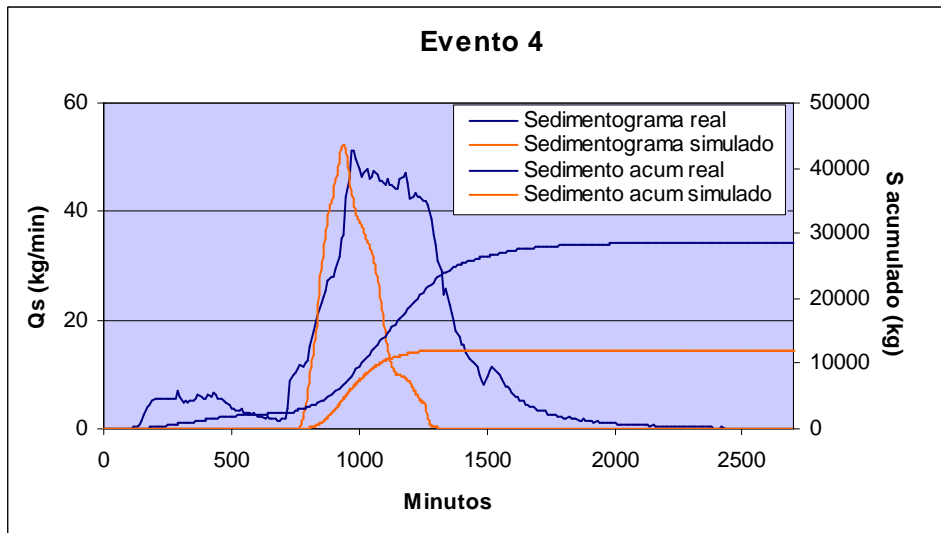
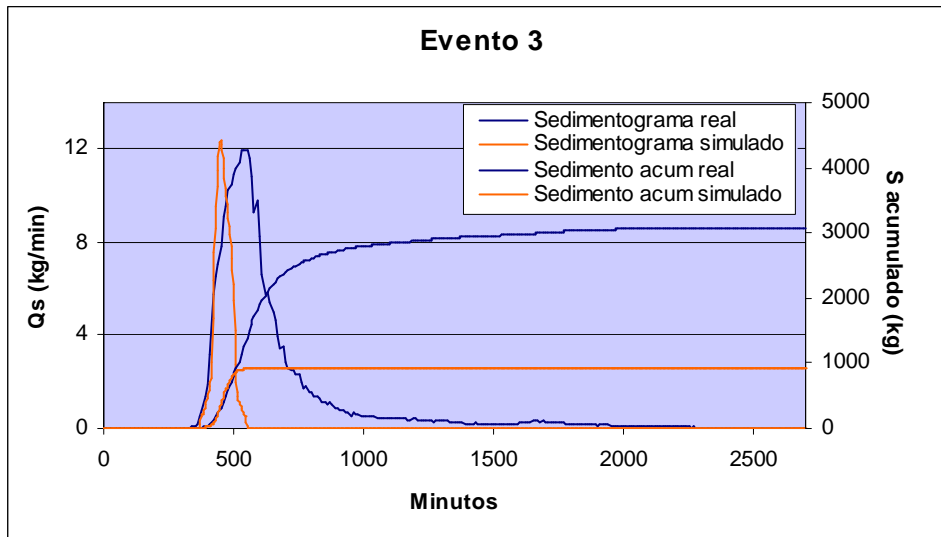
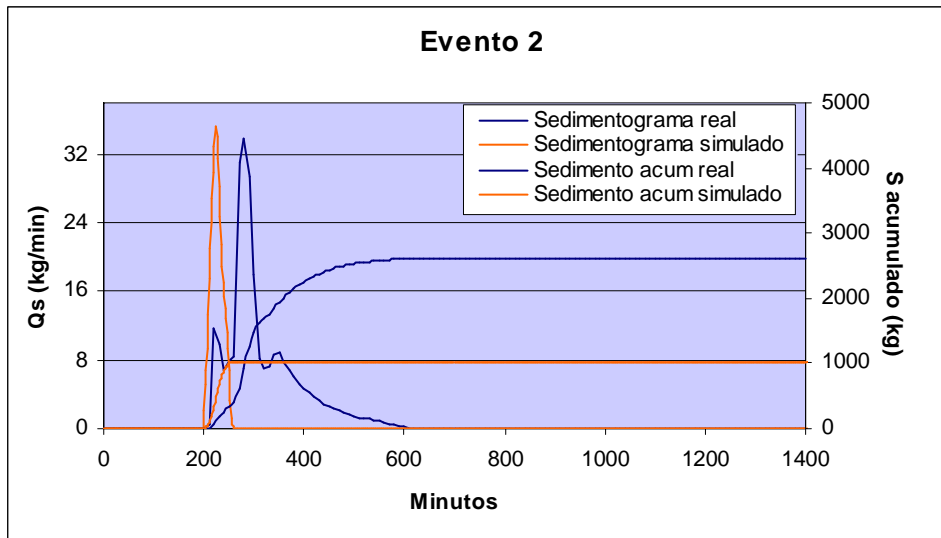


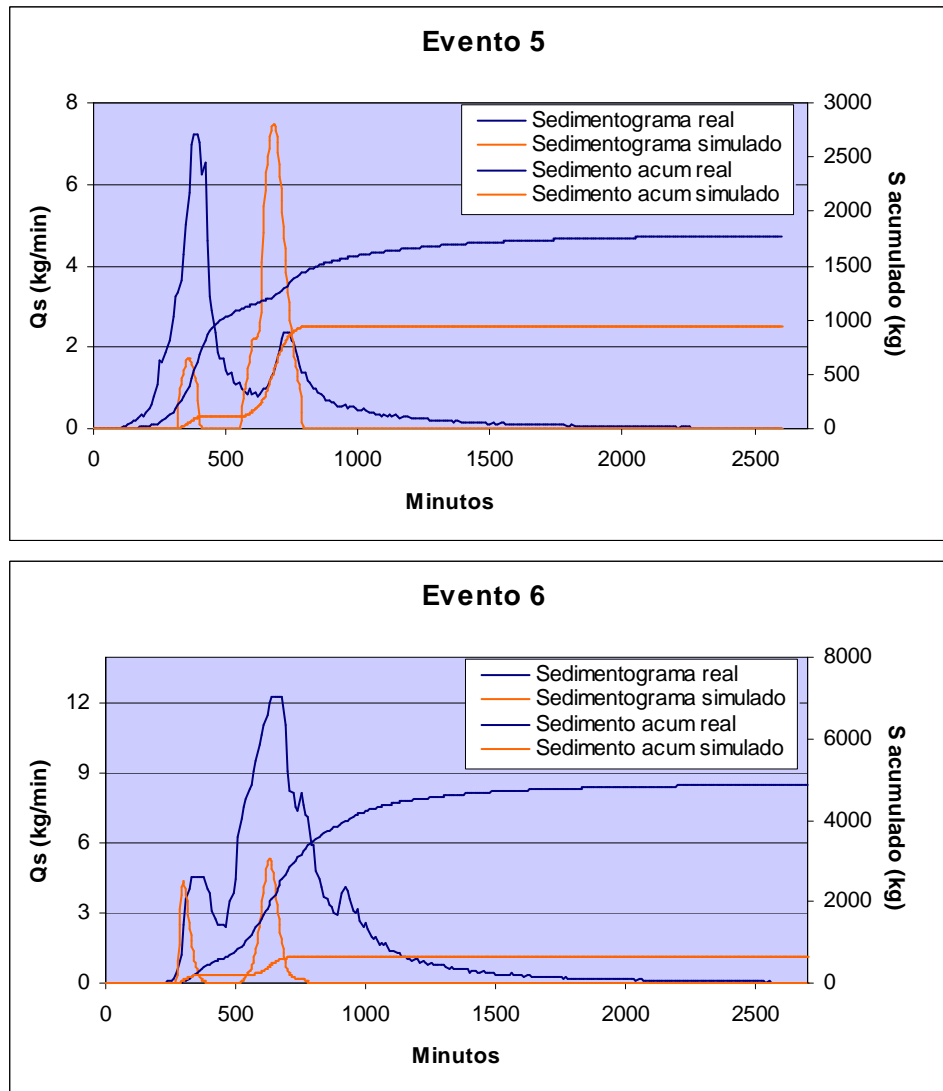
Fig. 3.3.2.12.- *Q punta y acumulado real frente al simulado*

Se puede apreciar que la calibración de los caudales punta, tiene una  $R^2=0,99$  muy elevado; además, la pendiente de la recta se ajusta muy bien a la bisectriz, por lo que simula con gran fidelidad la realidad en este aspecto. Por otra parte, el caudal acumulado tiene un coeficiente de regresión bueno. No obstante, la pendiente de la recta dista del valor 1. Así, el modelo subestima el volumen de agua acumulado.

A continuación, se estudiarán los resultados obtenidos para la calibración del sedimentograma (Fig. 3.3.2.13). Se optó por modificar (reducir) los valores de tamaño de partícula ( $D_{50}$  y no los correspondientes al parámetro COH (cohesión del suelo en saturación) ya que este último fue determinado experimentalmente.







**Fig. 3.2.2.19.-** Calibración de los sedimentogramas de cada uno de los eventos estudiados.

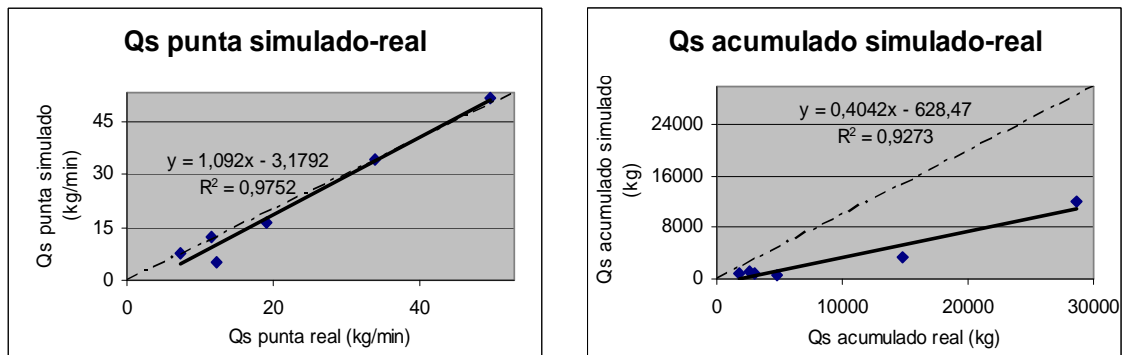
Los porcentajes que se tuvo que variar el tamaño de partícula se recogen en la Tabla 3.3.2.18.

**Tabla 3.3.2.18.-** Porcentaje de variación de los valores del  $n$  parámetro  $D_{50}$  a los de la calibración.

Evento	$\Delta D_{50}$ (%)
1	-65
2	-52
3	-35
4	-60
5	-54
6	-80
Promedio	-54

En general, todos los eventos se mueven en un valor de disminución similar (Tabla 3.3.2.18), que oscila entre 40 y 65%. En el caso del evento 6 se ha reducido el parámetro al máximo valor posible (20 $\mu$ m) y se ha conseguido ajustar bastante bien al primer pico del sedimentograma, pero resulta insuficiente en el segundo pico.

A continuación, se verá como se ajusta lo simulado por el modelo con la realidad. Para ello, se representarán los caudales punta de sedimentos y acumulados reales frente a los simulados (Fig. 3.3.2.20).



**Fig. 3.3.2.20.- Caudales de sedimento punta y acumulados reales frente a valores simulados**

Tal y como ha sucedido hasta ahora, el caudal punta se asemeja más a la realidad que la cantidad de sedimento acumulado; este último, subestimado (Fig. 3.3.3.20.). En cuanto, a la  $R^2$  la correlación es buena en ambos casos, siendo mejor en el primero.

### 3.3.3.- Comparación de las calibraciones (Larrañaga, 2006; Díez, 2007) con las de este trabajo

Una vez efectuados las simulaciones pertinentes, se pasará a analizar la respuesta del modelo al incorporar los datos experimentales. Para ello analizaremos los porcentajes de variación de los parámetros más sensibles para su calibración en La Tejería (Tabla 3.3.3.1) y Latxaga (Tabla 3.3.3.2).

**Tabla 3.3.3.1.- Porcentajes de variación de los parámetros de calibración según Larrañaga (2006) e incorporando datos experimentales en La Tejería**

Evento	Larrañaga (2006)			Datos experimentales	
	$\Delta$ FMIN (mm/h)	$\Delta$ COH (kPa)	$\Delta$ D50 ( $\mu$ m)	$\Delta$ FMIN (mm/h)	$\Delta$ D50 ( $\mu$ m)
1	0%	-20%	-80%	-95%	-76%
2	-35%	0%	-57%	-97%	-73%
3	-60%	-	-	-80%	-
4	-35%	-50%	-80%	-97%	-75%
5	-40%	-25%	-80%	-95%	-73%
6	-30%	0%	-5%	-95%	-52%
<b>Media</b>	<b>-33%</b>	<b>-38%</b>	<b>-54%</b>	<b>-93%</b>	<b>-70%</b>

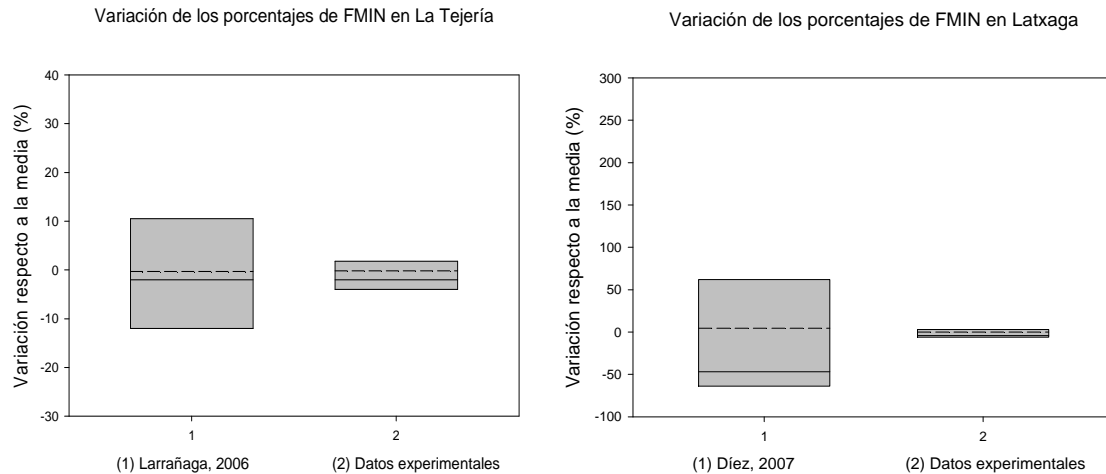
**Tabla 3.3.3.2.- Porcentajes de variación de los parámetros de calibración según Díez (2007) e incorporando datos experimentales en Latxaga**

Evento	Díez (2007)		Datos experimentales	
	$\Delta$ FMIN (mm/h)	$\Delta$ D50 ( $\mu$ m)	$\Delta$ FMIN (mm/h)	$\Delta$ D50 ( $\mu$ m)
1	-83%	-20%	-97%	-65%
2	+237%	-6%	-70%	-52%
3	-18%	-31%	-97%	-35%
4	-48%	-18%	-97%	-61%
5	-78%	-26%	-99%	-54%
6	-79%	-28%	-99%	-80%
<b>Media</b>	<b>-16%</b>	<b>-21%</b>	<b>-93%</b>	<b>-54%</b>

En lo referente a la conductividad hidráulica en saturación (FMIN), el porcentaje que debemos variar en las simulaciones a partir de fórmulas empíricas y tablas fue de un 33% en La Tejería y 16% en Latxaga. Por su parte, incorporando el valor estimado mediante los ensayos realizados con el simulador de lluvia, el valor es de -93% en ambas cuencas. Sin embargo, aunque en términos absolutos estos valores resultan mayores luego de incorporar los nuevos datos experimentales, el grado de variación de



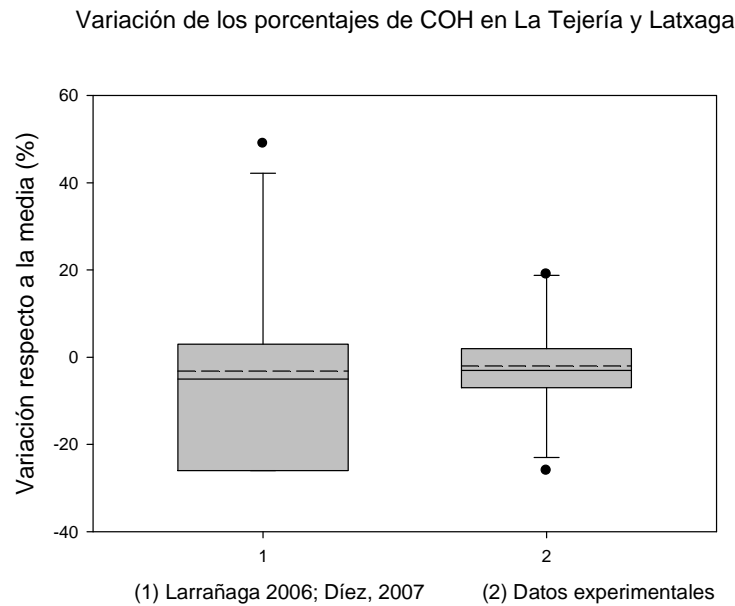
los mismos es, a su vez, menor (Fig. 3.3.3.1). Esto hace pensar que una posterior validación tendría un mejor ajuste si se incorporasen los presentes datos experimentales.



**Fig. 3.3.3.1.-** Grado variación de los porcentajes de calibración respecto a la media de FMIN en La Tejería (izq.) y Latxaga (der.)

Los elevados valores de infiltración registrados en campo concuerdan con determinaciones preliminares realizadas en diferentes puntos de La Tejería mediante el uso de infiltrómetros de doble anillo. Más aún, en este último caso la tasa de infiltración fue mayor a la medida en la presente investigación. Es de suponer, que las vías de flujo preferencial (macroporos) que se observan en campo, juegan un papel preponderante en la capacidad de infiltración de estos suelos. Esto explicaría en gran parte la discrepancia de nuestros valores experimentales con los tabulados.

Observando los parámetros que afectan a la calibración del sedimentograma, el objetivo inicial era calibrarlo mediante el tamaño de partícula ( $D_{50}$ ) ya que la cohesión ( $COH$ ) se midió en campo. Así pues, en la cuenca de La Tejería, todos los eventos simulados con los datos experimentales se han podido calibrar modificando el parámetro  $D_{50}$ , mientras que esto no fue posible a partir de los valores tabulados, por lo que existe una mejora sustancial en este aspecto. En cambio, en Latxaga, sí se consiguió realizar la calibración modificando únicamente el tamaño de partícula. No obstante, tal y como ocurre con la conductividad hidráulica en saturación, el porcentaje en valor absoluto es mayor con los datos experimentales, pero el grado de variación de dichos porcentajes es menor (Fig. 3.3.3.2) lo cual nuevamente sugiere que el proceso de validación tendría más éxito utilizando la información experimental citada.



**Fig. 3.3.3.2.-** Grado variación de los porcentajes de calibración respecto a la media de COH uniendo los valores de La Tejería y Latxaga en los distintos tipos de calibraciones realizados

Los variables erosivas que fueron modificados en el archivo paramétrico, principalmente fueron COH y EROD. Según los valores tabulados, en La Tejería, la cohesión esperada sería de 10,4 kPa; mientras que los valores experimentales son notoriamente superiores a sugeridos (20-40 kPa).

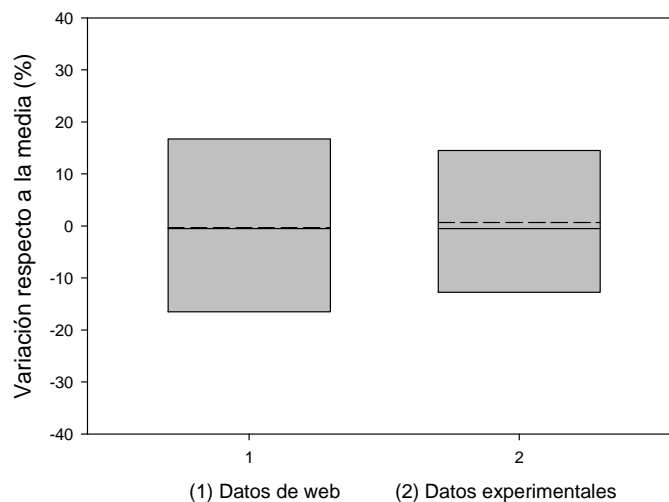
Para Latxaga, la cohesión oscila en valores de 48-70 kPa y según los valores sugeridos en el propio modelo (Morgan et al.; 1998), para nuestra clase textural debería de ser un valor entorno a 9,4 kPa. A su vez, el parámetro EROD, aumenta de forma significativa ya que alcanza valores que van de 7-13,5 g/J y lo estipulado en tablas ronda el 1,7g/J. Resumiendo, se podría decir que el parámetro EROD favorecería el arranque de partículas ya que se esperaría un mayor erosión de partículas por unidad de energía cinética de la lluvia; , pero, en contrapartida, la cohesión del suelo también ha aumentado.

Otro de los parámetros medidos en campo fue la humedad antecedente (*THI*), determinante en la respuesta del modelo (Govers, 1991). Para ver la importancia de esta variable, se ha comparado el porcentaje que se ha modificado la conductividad hidráulica en saturación para obtener una buena calibración del hidrograma introduciendo por un lado registros oficiales de humedad edáfica ([www.cuencasagrarias.navarra.es](http://www.cuencasagrarias.navarra.es)); y por otro lado los medidos en campo para cada plano. Como resultado nos dan los valores reflejados en la Tabla 3.3.3.3. Asimismo, se realizó un diagrama de cajas para ver su grado de variación respecto a la media (Fig. 3.3.3.3). Nuevamente se observa una menor dispersión en los valores porcentuales de ajuste lo que nos lleva a las mismas conclusiones antedichas.

**Tabla 3.3.3.3.-** Porcentajes de modificación de FMIN efectuados para una óptima calibración con los valores de humedad provenientes de registros gubernamentales (Web) y con datos experimentales propios.

EVENTO	Web	Experimentales
	$\Delta$ FMIN (%)	$\Delta$ FMIN (%)
1	0	-15
2	-35	-55
3	-60	-45
4	-35	-48
5	-40	-25
6	-30	-30
<b>Promedio</b>	<b>-33</b>	<b>-37</b>

Variación de los porcentajes de FMIN en La Tejería y Latxaga



**Fig. 3.3.3.3.-** Grado de variación de los porcentajes de calibración de FMIN respecto a la media incorporando los datos de humedad antecedente de la página web y los experimentales en La Tejería.

Otro de los parámetros medidos en campo fue la energía de la gota de lluvia (*EROD*). Realizando el mismo procedimiento que con la humedad inicial pero en este caso para la erosión, es decir, por un lado intentar calibrar el sedimentograma con los datos tabulados del parámetro modificando el tamaño de partícula ( $D_{50}$ ), y por otro lado el mismo procedimiento pero sustituyendo los valores de *EROD* por los obtenidos en campo. Se observó que no existían diferencias en la calibración, lo que pone de manifiesto la reducida sensibilidad de dicho parámetro.

Por norma general el modelo simula bien los caudales punta mientras que subestima la cantidad de agua y sedimentos acumulada. Así, la pendiente de las rectas en el caso de los caudales punta ronda el valor 1 comparando el real con el simulado, mientras que en los del acumulado es inferior.

Por lo tanto, la medición de valores en campo aporta una mejora a la hora de realizar una posterior validación del modelo. No obstante, las repeticiones realizadas con el simulador de lluvia son escasas para ser concluyentes. Asimismo, la incorporación de datos como la humedad edáfica contribuye de forma importante en una buena modelización, ya que hasta ahora solo se contaba con una única medición para toda la cuenca.

## 4.- CONCLUSIONES

## 4.- CONCLUSIONES

Mediante la incorporación de datos experimentales medidos en campo no se manifiesta, a primera vista, una mejora sustancial en la actuación del modelo EUROSEM ya que una óptima calibración requiere, en general, drásticos ajustes de los valores simulados. No obstante, este ajuste es claramente más homogéneo si se utilizan datos experimentales recabados in situ; lo que haría posible una mejor validación y por tanto fiabilidad del modelo como herramienta de simulación.

El modelo no es capaz de predecir con certeza la infiltración del suelo cuando predominan vías de flujo preferencial de agua (por ejemplo: macroporos, grietas y bioporos), por lo que da mejores resultados con valores menores que los medidos en campo. Es así que se hace muy dificultoso realizar una correcta calibración del hidrograma sin tener que recurrir a la incorporación de valores de conductividad hidráulica muy alejados de los reales o experimentales (valores referenciales). Así, se pone de manifiesto la sensibilidad que presenta el modelo en cuanto a este parámetro, siendo un factor clave para la simulación del hidrograma.

Otros dos parámetros importantes en la calibración del hidrograma son la humedad antecedente (*THI*) y la rugosidad del terreno. En lo referente a la humedad antecedente, y dado la alta variabilidad espacial propia de este parámetro, se obtiene una significativa mejora en la calibración cuando los valores de humedad son promedios de determinaciones hechas cubriendo la (casi) totalidad del área en estudio; en el presente estudio se contó con una medición de humedad cada 4-5 hectáreas.

Por otro lado, la rugosidad del terreno (*RFR*) también juega un papel determinante en la respuesta del modelo y muestra una sensibilidad notoria, sobre todo en eventos en los que la descarga es de escasa magnitud: En este último caso, el porcentaje de escorrentía retenido en superficie (almacenaje superficial) puede fácilmente ser cercano al ciento por ciento.

Por otro lado, la utilización de valores de cohesión (*COH*) in situ, se traduce en una más satisfactoria (más homogénea) calibración del sedimentograma. Además, es un parámetro de fácil y rápida determinación en campo.

Asimismo, y sorprendentemente, la determinación experimental del parámetro EROD (sedimentos arrancados por unidad de energía cinética de la lluvia) se tradujo en una insignificante mejora en la calibración.

El hecho de emplear -en los dos tipos de evaluaciones realizadas (con datos experimentales y tabulados)- el caudal punta y el valor punta de concentración de sedimentos para la calibración de los hidrogramas y sedimentogramas respectivamente, nos lleva en la mayoría de los casos a una subestimación de la escorrentía total, así como de los sedimentos acumulados.

Por todo lo comentado anteriormente, se puede decir que EUROSEM es una buena herramienta de simulación de tendencias incorporando datos experimentales, objetivo perseguido para una mejora en la validación del modelo. Sin embargo, para ser concluyentes en este aspecto haría falta realizar un mayor número de experimentos en cada tratamiento (estimativamente, un mínimo de cinco).

Por otro lado, la experimentación con simulación de lluvias se muestra como una forma idónea de recabar información sensible puesto que permite estudiar y medir la infiltración y la escorrentía en condiciones muy próximas a las naturales.

Por último y viendo la relevancia que las vías de flujo preferencial de agua parecen tener en la infiltración de los suelos en las cuencas bajo estudio, se haría necesario o bien un ajuste en la técnica de visualización de macroporos utilizada en esta investigación, o la utilización de una mejor adaptada a nuestros suelos.

## **5.- REFERENCIAS**



## 5.- REFERENCIAS

Álvarez Mozos, J., Larrañaga, A. y Casalí, J. 2006. Presentación de un perfilador láser para la medición de la rugosidad superficial del suelo. Análisis de la influencia del laboreo en los parámetros de rugosidad. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Pamplona. Documento sin publicar.

Amezkoa, M. 2002. Evaluación del modelo EUROSEM en la zona media de Navarra. Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Pamplona. Documento sin publicar.

Arcement, G.J., Schneider, V.R. 1989. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2339.

Asociación Española Agricultura de conservación/ Suelos vivos. 2005. Erosión: La importancia de la conservación del suelo.

Auerswald, K. 1992. Changes in surface roughness during erosive rains. Lehrstuhl für Bodenkunde, TU München, D-8050 Freising.

Beasley, D.B.; Monke, E.J. & Huggings, L.F., 1977, ANSWERS: A model for watershed planning. Purdue Agricultural Experiment Station Journal Paper, 7083, 34pp.

Bennett, J.P., 1974. Concepts of Mathematical Modeling of Sediment Yield. Water Resources Research, 10:485-492.

Bos, M.G., 1978. Discharge Measurement Structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands, 464 pp

Bouman, H.C., Dekker, L.W., Dijkema, R., Fulshof, J., Van der Molen, W.H. 1988. A new technique for evaluating the presence of preferential flow paths in nonstructured soils. Soil Science Society, Vol. 52, 1192-1194.

Brakensiek, D.L. 1979. Comments on empirical equations for some soil hydraulic properties by Roger B. Clapp y George M. Hornberger. Water Resources Research 15(4), pp. 989-990.

Brakensiek, D.L., Rawls, W.J. 1983. Agricultural management effects on soil water processes. Part II: Green and ampt parameters for crusting soils. Transactions of the ASAE. 1753-1757.

Brandt, C.J. 1990. The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena* 16, 507-524.

Calvo Cases, A., Gisbert, J.M., Palau, E. y Romero, E. 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En *Monografías de la SEG*, 1(M. Sala y F. Gallart, eds.), Sociedad Española de Geomorfología, pp. 6-15, Zaragoza.

Casalí, J., Gastesi, R., Álvarez-Mozos, J., De Santiesteban, L.M., Del Valle de Lersundi, J., Giménez, R., Larrañaga, A., Goñi, M., Agirre, U., Campo, M.A., López, J.J., Donézar, M. 2008. Runoff, erosion, and water quality of agricultural watersheds in central Navarre (Spain). *Agricultural Water Management* 95, 1111-1128.

Casalí, J., López, J.J. y Giráldez, J.V. 1999. Ephemeral gully erosion in Southren Navarra (Spain). *Catena* 36: 65-84.

Casalí Sarasíbar, J., Del Valle de Lersundi, J., Goñi Garatea, M., Agirre Bereziartua, U., Gastesi Barasoain, R., De Santiesteban Comino, L.M., Pérez Martín, C., Álvarez Mozos, J., Campo Bescós, M.A., López Rodríguez, J.J. 2005b. Escorrentía, erosión y calidad de aguas en cuencas agrarias de Navarra. III Congreso de agroingeniería, León, 21-24 de septiembre.

Chow, V.T., Maidment, D.R., y Mays, L.W. 1994. *Hidrología aplicada*. Mc Graw-Hill.

Cooper, S., Rickson, R.J. 2006. The role of conservation soil management on soil and water protection at different spatial scales. School of Applied Sciences. Cranfield University.

De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Ritsema, C.J., Jetten, V.G. 1985. LISEM Limburg Soil Erosion Model. A user guide. Version 3.1.; May 1995. The Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.

Del Valle de Lersundi, J., Donézar, M., 1995. Erosión hídrica en las áreas cultivadas de Navarra. *Navarra Agraria* 91, 25–32

Díez, J. 2007. Análisis de la erosión en la cuenca agraria experimental de Latxaga. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Pamplona. Documento sin publicar.

- Donézar, M. y Del Valle de Lersundi, J. 2001. Red de Cuencas Experimentales Agrarias de Navarra. XIX Congreso Nacional de Riegos. Zaragoza.
- Everaert, W. 1991. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flows. *Earth Surface Processes and Landforms* 16, 513-532.
- García Ruíz, J.M., López Bermúdez, F. 2009. La Erosión del suelo en España. pp 74-78
- Giménez, R. Casalí, J, Díez, J. 2009. Effect of sediments generated by rill erosion on soil hydrology at small spatial scale. EGU General Assembly 2009. Geophysical Research Abstracts, Vol.11, 2009-0, 2009. Viena, Austria.
- Govers, G. 1991. Spatial and temporal variations in splash detachment: a field study. *Catena Supplement* 20, 15-24.
- Herwitz, S.R. 1985. Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees. *Journal of Hydrology*, 77 (1985) 237-252.
- Holtan, H.N. 1961. A concept for infiltration estimates in watershed engineering. USDA Agricultural Research Service ARS-41-51.
- Isidoro, D., Quílez, D., Aragiés, R., 2003. Sampling strategies for the estimation of salt and nitrate loads in irrigation return flows: La Violada Gully (Spain) as a case study. *Journal of Hydrology* 271, 39–51.
- Kirby, M.J. 1980. Modelling water erosion processes. In Kirby, M.J. and Morgan, R.P.C. (eds), *Soil erosion*, pp. 183-216, Wiley.
- Knisel, W.G., 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report No. 26, USDA-ARS, 640pp., Washington OC.
- Lana-Renault, N., J. Latron and D. Regiés. 2007. Streamflow response and water-table dynamics in a sub-Mediterranean research catchment (Central Pyrennes). *Journal of Hydrology* 347:497-507.
- Larrañaga Urien, A. 2006. La erosión del suelo en la cuenca agraria experimental de La Tejería. Universidad Pública de Navarra. Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Pamplona. Documento sin publicar.

Latron, J. 2003. Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineos catalanes). Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 269 pp, Barcelona.

Merriam R. A. 1973. Fog drip from artificial leaves in a fog wind tunnel. *Water Resources Research* 9: 1591– 1598.

Meyer, L.D. 1985. Rainfall simulators for soil erosion research. *Trans of the ASAE*, 8: pp 63-65.

Ministerio del Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2009. El Inventario Nacional de Erosión de Suelos 2002-2012. Metodología y resultados a mitad de su desarrollo. 5º Congreso Forestal Español. 22 de septiembre de 2009, Ávila.

Molina, A., Govers, G., Veerle, V., Poesen, J., Zeelmaekers, E., Cisneros, F. 2007. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *Catena* 71, 357-370.

Morgan, R.P.C. 1994. The European Soil Erosion Model: an up-date on its structure and research base. *Conserving Soil Resources: European perspectives*. Wallingford. CAB International: 289-299.

Morgan, R.P.C., Quiton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., Folly, A.J.V. 1998. The European Erosion Soil Model (EUROSEM): documentation and user guide. Version 3.6. Silsoe College, Cranfield University.

Morgan, R.P.C. 1966. Erosión y Conservación de Suelos. Ediciones Mundi-Prensa.

Nearing, M.A.; Foster, G.R; Lane, L.J., Finckers, S.C, 1989, A process based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology, *Transactions of the American Engineers* 32, 1587-1593pp

Poesen, J.W., Torri, D., y Bunte, K. 1985. Effects os Rocks frangments on soil erosion by water al different spatial scales: a review. *Catena Supplement* 1, 113-126.

Quinton, J.N. 1994. The validation of physically based erosion models with particular reference to EUROSEM. Ph.D Thesis. Cranfield University. Silsoe, Bedford, UK.

Rabadà, D., Gallart, F., Llorens, P. 1994. Instrumentación para el estudio de la variabilidad de la humedad de los suelos de Cal-Parisa (Alt Llobregat). Aplicación del método TDR y primeros resultados. En: Geomorfología de España (J. Arnáez Vadello, J.M. García Ruíz y A. Gómez Villar, eds.). Sociedad Española de Geomorfología, pp. 153-171, Logroño.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. 1989. Estimation os soil water retention and hydraulic properties. Unsaturated Flow In Hidrologic Modelling: Theory and Practise. 275-300.

Rickson, R.J. (1994). Potential applications of European Erosion Soil Model (EUROSEM) for evaluation soil conservation measures. Conserving Soil Resources. European Perspectives. 326-335. CAB International. Wallingford, UK.

Roquero, C., Porta, J. 1992. Agenda de campo para el estudio del suelo. pp. 64

Salvany, M.C., Marqués, M.A., Gallart, F. 1996. Modelos de base física: Características y utilidades. IV Reunión de Geomorfología. Grandal d'Anglade, A. y Pages Valcarlos, J., Eds. Sociedad Española de Geomorfología. O Castro, A Coruña.

Smith, R.E., Goodrich, D., y Quinton, J.N. 1995. Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: The KINEROS2 and EUROSEM models, Journal of Soil and Water Conversation.

Vickers, A., Morgan, R.P.C., Vella, P. (1996). Field investigations of different techniques for measuring surface soil shear strength, Soil Technology 9, pp. 101-11.

Woolhiser, D.A., Smith, R.E. y Goodrich, D.C. 1990. KINEROS: A cinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. USDA Agricultural Research Service ARS-77.

## 6.- ANEXOS

## **ANEXO 1**

### **Distintos modelos hidrológicos**

Los modelos hidrológicos se pueden dividir en dos grandes grupos; los modelos empíricos y los modelos de base física:

- **Modelos empíricos:** El modelo más sencillo es el de tipo caja negra y relaciona la pérdida de sedimentos con la lluvia o escorrentía (Morgan, 1966).

Uno de los modelos que pertenece a este grupo es SLEMSA (*Soil Loss Estimator for Southern Africa*) fue desarrollado a partir de datos de Zimbaue para evaluar la erosión resultante en diferentes sistemas agrícolas y para recomendar las medidas adecuadas de conservación. La técnica ha sido adoptada por todos los países del África del Sur.

- **Modelos de base física:** Se han desarrollado modelos que predigan, además de la escorrentía y pérdida de suelo totales, la distribución espacial de la escorrentía y sedimentos sobre la superficie del suelo durante una tormenta aislada. Para conseguir esos objetivos, los modelos empíricos tienen serias limitaciones. No pueden aplicarse universalmente, ni simular el movimiento de agua y sedimentos sobre la superficie y no pueden utilizarse con escalas que varíen desde las parcelas individuales a pequeñas cuencas. Se necesita, por lo tanto, un método de modelización con mayor fase física. En realidad, los modelos con base física todavía se apoyan en ecuaciones empíricas para describir los procesos de erosión. Son muchos los modelos que se han creado teniendo en cuenta las condiciones anteriores:
  - Modelo CREAMS ( *Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) (Knisel, 1980): es un modelo de campo que sirve para evaluar la contaminación difusa por la práctica de actividades agrícolas; teniendo como base la hidrología, la erosión y la química.
  - Modelo ANSWERS (*Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation*): Simula el comportamiento de cuencas agrícolas. Predice la erosión causada por usos y prácticas de manejo específicos; también proporciona un análisis de calidad de agua asociado a sedimentos y productos químicos. ANSWERS es un modelo limitado a eventos singulares.

- Modelo KINEROS ( *KINematic Runoff and EROSION model*)(Woolhiser *et al.* 1990): Es un modelo basado en eventos que predice la escorrentía, la infiltración y la erosión para pequeñas cuencas.
- Modelo WEPP ( *Water Erosion Prediction Project*): es un modelo basado en procesos que se apoya en los conocimientos sobre hidrología y erosión, diseñado para reemplazar a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en las valoraciones de erosión del suelo por organizaciones comprometidas en la conservación del agua y el suelo.
- Modelo GUESS ( *Griffith University Erosion Sedimentation System*): se trata de un modelo de un modelo temático que simula los procesos de erosión y deposición a lo largo de una ladera.
- Modelo LISEM ( *Llomburg Soil Erosion Model*): Modelo hidrológico y de erosión distribuido, pensado para eventos integrado completamente en un SIG raster.
- Modelo EUROSEM ( *European Soil Erosion Model*) (Morgan *et al.*, 1998): Modelo hidrológico y de erosión basado en eventos y desarrollado para computar la escorrentía y el transporte de sedimentos sobre la superficie del suelo como consecuencia de una tormenta.

Con los modelos actuales se pueden realizar 2 tipos de simulación: continua y por acontecimientos o eventos. CREAMS (Knisel, 1980) y WEPP (Nearing *et al.*, 1989) son dos modelos de simulación continua. Además, el modelo WEPP dispone de la opción de presentar los resultados de las simulaciones por acontecimientos, o con medias diarias, o mensuales o anuales. Por otra parte, ANSWERS ( Beasley, Monke y Huggins, 1977), KINEROS (Woolhiser, Smith y Goodrich, 1990) y EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998) forman parte de los modelos de simulación por eventos. En la Tabla A.1.1 se resumen las diferencias más importantes de cada modelo.

Estos cinco modelos hacen una simulación de los procesos hidrológicos (infiltración y escorrentía) y erosivos (transporte de sedimento y deposición) a partir de la precipitación y según el tipo de gestión en la zona de cultivo. Todos ellos operan con estos procesos a nivel de parcela y de sedimentación en canales, y además, KINEROS, EUROSEM y WEPP analizan la erosión en canales. Estos tres últimos, además, pueden relacionar varias parcelas y canales, y por lo tanto, obtener simulaciones a escala de una cuenca.



**Tabla A.1.1-** Comparación de la descripción de los procesos involucrados en cinco modelos de erosión diferentes.

	<b>CREAM</b>	<b>WEPP</b>	<b>ANSWERS</b>	<b>KINEROS</b>	<b>EUROSEM</b>
<b>Simulación</b>	Continua	Continua	Tormentas	Tormentas	Tormentas
<b>Área</b>	Parcela<5ha	Parcela y cuenca	Parcela distribuida	Parcela y cuenca	Parcela y cuenca
<b>Infiltración</b>	CN-SCS	Green & Ampt	USDAHL	Smith & Parlange	Smith & Parlange
<b>Escorrentía</b>	m. infiltrc.	Eq. Cinemática de ondas	Eq. Manning	Flujo Hortoniano	Flujo Hortoniano
<b>Erosión</b>	Eq. Yalin	Eq. Yalin	USLE	Eq. Bennet	Eq. Bennet
<b>Canales</b>	Deposición	Erosión y Deposición	Deposición	Erosión y Deposición	Erosión y Deposición
<b>Fusión de hielo</b>	Sí	Sí	No	No	No
<b>Evaporación</b>	Sí	Sí	No	No	No

**ANEXO 2****Valores tabulados de distintos parámetros de entrada del modelo EUROSEM (Morgan *et al.*, 1998)****Tabla A.2.1.- Valores de los coeficientes de rugosidad de Manning,  $n_i \cdot 1000$  para diferentes cultivos y épocas (De Roo, 1995)**

	E	F	M	A	M*	M**	Jn*	Jn**	Jl*	Jl**	A	S	O	N	D
Trigo	119	119	119	84	102	123	140	140	161	161	-	-	119	119	119
Remolacha	-	-	-	115	115	115	118	124	127	127	127	124	124	124	-
Patata	-	-	-	135	135	135	138	144	147	147	144	138	-	-	-
Maíz	-	-	-	80	80	80	80	80	80	80	80	80	-	-	-
Bosque	225	225	225	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	150	150

**Tabla A.2.2.- Relación de la textura con la capilaridad efectiva (Woolhiser *et al.*, 1990)**

Textura	Porosidad (v/v)			Saturación residual (v/v)	Saturación máxima (v/v)	Capilaridad efectiva (mm)		
	<u>baja</u>	<u>media</u>	<u>alta</u>	<u>media</u>	<u>media</u>	<u>baja</u>	<u>media</u>	<u>alta</u>
Arenosa	0.37	0.44	0.50	0.020	0.42	22	101	207
Arena franca	0.37	0.44	0.51	0.035	0.41	41	147	323
Franca arenosa	0.35	0.45	0.56	0.040	0.41	98	248	526
Franca	0.38	0.46	0.55	0.030	0.43	185	375	937
Franca limosa	0.42	0.50	0.58	0.015	0.47	220	485	1043
Ar.fr.arenosa	0.33	0.40	0.46	0.070	0.33	220	617	1070
Arcilla franca	0.41	0.46	0.52	0.070	0.39	250	533	1174
Ar.fr.limosa	0.42	0.47	0.52	0.380	0.43	370	720	1470
Arcillo arenosa	0.37	0.43	0.49	0.110	0.32	373	768	1730
Arcillo limosa	0.43	0.48	0.53	0.060	0.42	430	812	1700
Arcillosa	0.43	0.48	0.53	0.090	0.39	460	890	1830

**Tabla A.2.3.- Valores guía para la erosionabilidad de suelos (Poesen , 1985; Poesen y Torri,1988); Govers , 1991 y Everaert (1992)**

Textura	Erosionabilidad ( g/J)		
	<u>bajo</u>	<u>medio</u>	<u>alto</u>
Arcilloso	1,7	2,0	2,4
Franco arcilloso	1,4	1,7	1,9
Limoso	0,8	1,2	1,6
Franco limoso	0,8	1,5	2,3
Franca	1,0	2,0	2,7
Franco arenoso	1,7	2,6	3,1
Arenoso franco	1,9	3,0	4,0
Arenoso	1,0	1,9	3,0

**Tabla A.2.4.-** Valores guía para la cohesión de suelos (Vickers, 1993)

Textura	No compactado			compactado		
	<u>bajo</u>	<u>medio</u>	<u>alto</u>	<u>bajo</u>	<u>medio</u>	<u>alto</u>
Arcilloso	10	12	14	29	33	44
Franco arcilloso	9	10	14			
Arcillo limoso	9	15	11			
Franco arcillo limoso	10	9	26			
Franco arcillo arenoso	8	3	10			
Franco limoso	2	3	5	6	9	17
Franco	2	3	4	7	7	8
Franco arenoso fino	2	3	3	5	6	8
Franco arenoso	2	2	4	4	7	10
Arenoso franco	2	2	3	6	8	9
Arenoso	2	2	3	8	8	9

**Tabla A.2.5.-** Valores guía para el incremento en la cohesión debido al cultivo (Vickers, 1993)

Tipo de vegetación	Incremento COH (kPa)
Cebada	0,2 – 0,6
Pasto	1 – 8
Marram grass	1,5 – 15
Chaparral, matorral	0,3 – 3
Alfalfa	10
Aliso	2 – 12
Picea	4 – 12
Abeto del Canadá	1 – 8
Sauce	6
Álamo	2
Arce	4 – 6
Pinos	4 – 10
Bosque coníferas	1 – 17,5

**Tabla A.2.6.-** Valor del parámetro COVER dependiendo de la época del año (De Roo, 1995)

	E	F	M	A	My*	My**	Jn*	Jn**	J*	J**	A	S	O	N	D
Trigo	0,02	0,04	0,06	0,13	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Remolacha	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10	0,32	0,68	0,85	0,82	0,80	0,76	0,72	0,68	0,00
Patata	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,20	0,50	0,92	0,80	0,55	0,20	0,00	0,00	0,00
Maíz	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,12	0,30	0,50	0,60	0,55	0,50	0,00	0,00	0,00
Bosque	0,70	0,70	0,70	0,80	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95

**Tabla A.2.7.-** Valor del parámetro DINTR dependiendo del tipo de cultivo. Horton (1991); Zinke (1967); Herwitz (1985).

Tipo de cultivo	DINTR (mm)
Prado	1,2
Molinia	0,2
Pasto	2,5
Trébol	2,3
Pasto azulado	2,3
Brezo	1,5
Helecho	1,3
Bosque trpical	2,5
Bosque templado: invierno	1,0
Bosque templado: verano	2,5
Pinos	1,0
Bosque: abetos	1,5
Bosque perennifolio	0,8
Manzano	0,5
Soja	0,7
Patatas	0,9
Col	0,5
Coles de Bruselas	1,0
Remolacha	0,6
Mijo	0,3
Trigo de primavera	1,8
Trigo de invierno	3,0
Cebada, centeno y avena	1,2
Maíz	0,8
Tabaco	1,8
Alfalfa	2,8

**Tabla A.2.8.-Valores quías de PBASE para diferentes cultivos (Holtan, 1961)**

Uso suelo o cobertura	Condición cobertura	PBASE
Barbecho: después de cultivos en línea		0,1
Barbecho: después de pasto		0,3
Cultivos en línea	Pobre	0,1
	Buena	0,2
Grano pequeño	Pobre	0,2
	Buena	0,3
Heno-leguminosa	Pobre	0,2
	Buena	0,4
Heno-pasto	Pobre	0,4
	Buena	0,6
	Excelente	0,8
Pasto	Pobre	0,2
	Buena	0,3
	Excelente	0,4
Pasto temporal-prado	Pobre	0,4
	Buena	0,5
	Excelente	0,6
Pasto permanente o pradera	Pobre	0,8
	Buena	1,0
Bosques		1,0

**Tabla A.2.9.- Valores guía para PLANTH, PLANGE y SHAPE.** Cobley (1956); Bogdan (1977); Tindall (1983); Doorrembos y Kassam (1986); De Rougemont (1989); y, Langer y Hill (1991)

Tipo planta	Altura (m)	Ángulo de inclinación (°)	Factor (Shape)
Bosque templado	20-40	10-80	2
Bosque de coníferas: pino	30-40	10-80	1
Bosque de coníferas: abetos	50-60	10-80	1
Manzano	10-15	10-20	2
Melocotonero	6-7	40-60	2
Cítricos	6-12	10-80	2
Olivo	12-15	30-40	2
Platanero	2-5	20-80	2
Vid	0,8-1	40-80	2
Prado	0,05-0,06	60-90	1
Molinia	0,02-1,2	75-80	1
Pasto	0,1-0,9	45-60	1
Alfalfa (mala hierba)	0,5-1	70-75	1
Avena loca	0,5-1,5	20-90	1
Pasto bermuda	0,3-0,6	50-60	1
Pasto guinea	2-3	20-60	1
Prado Rodesia	0,5-2	50-80	1
Pradera	0,8-1	40-80	1
Prado	0,1-1	50-80	1
Trébol	0,3-0,6	10-60	2
Alfalfa	0,3-0,9	50-70	2
Brezo	0,5-0,6	0-90	2
Alubia	1-3	60-80	2
Habichuelas	0,3-1	60-80	2
Harina de soja	0,1-0,2	20-40	2
Guisante	3-4	20-40	2
Garbanzo	0,4-0,5	60-70	2
Algodón	0,8-1,2	0-20	2
Cacahuete	0,2-0,6	40-80	2
Lúpulos	5-6	15-70	2
Maíz	2-3	50-80	2
Sorgo	1-2	50-80	2
Colza	1-1,4	35-60	2
Linaza	0,8-1,6	60-90	2
Piña americana	0,5-1	70-90	2
Patata	0,6-1	70-80	2
Mandioca	2,5-3	70-80	2
Arroz	0,5-1	70-80	1
Remolacha azucarera	0,8-1	70-90	2
Caña de azúcar	3-6	10-60	2
Tabaco	1,5-2	80-90	2
Trigo, cebada, avena	0,5-1,5	80-90	1
Centeno	1-2	80-90	1
Caucho	18-30	0-90	2

